

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Geisteswissenschaften auf der Verliererstraße?

Es ist schon merkwürdig: Seit geraumer Zeit wähnen sich die Geisteswissenschaftler in der Defensive. Unter dem Ruch des Unwirklichen stünden sie sowie unter ständigem Rechtfertigungszwang, beobachtete etwa die FAZ, und begegneten sogar echter Geistfeindschaft. Auch auf dem 44. Deutschen Historikertag in Halle beklagten sie im September ihre Marginalisierung. Stellen- und Drittmittelmangel geriet ihnen beinah zum wichtigsten Thema.

Nun ist es ja so, dass wir in Spektrum der Wissenschaft – wenn auch mit einem Schwerpunkt in den harten Naturwissenschaften – grundsätzlich für alle Wissenschaften offen sind. Aber unsere Redakteure haben häufig Schwierigkeiten, bei den Geisteswissenschaften hinreichend interessante Themen zu entdecken. Interessant ist natürlich ein sehr relativer Begriff. Aber Sie, unsere Leser,

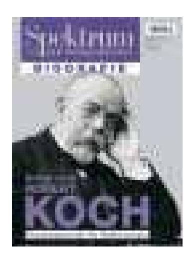
»Ohne Geisteswissenschaften haben wir ein Weltkulturerbe ohne Erben«

reagieren sofort kritisch, wenn wir Ihnen zu weiche oder gar abseitige Forschungen aus den, wie es im Englischen heißt, *humanities* auftischen. Oder Sie strafen solche Artikel, wie unsere monatlichen Leserumfragen zeigen, mit stiller Nichtbeachtung. Und eher selten können wir Ihnen daher einen Artikel offerieren wie in diesem Heft auf Seite 64 über das Aussterben der Sprachen.

Das hat nun gar nichts damit zu tun, dass wir etwa einer Zwei-Kulturen-These à la Charles Percy Snow anhingen, wonach naturwissenschaftliche und humanistische Bildung die Gesellschaft streng teile und wir nur der ersten Fraktion angehörten. Der Ex-Max-Planck-Präsident Hubert Markl bezeichnete dieses kulturelle Spaltungsirresein in einem „Spiegel“-Essay zurecht als Schnee von gestern, als Ausweis eines Bildungsmangels: „Der Gegensatz“ bestehe vielmehr „zwischen rational aufgeklärten oder nicht von Aufklärung geprägten Bildungskulturen“.

Da begibt sich mit Markl ein Biologe in die Schlacht, in der man doch zuallererst Geisteswissenschaftler erwartet. Besser, wenn sie in eigener Sache das Beste tun, was ihres Amtes ist: das Wort ergreifen!

Kürzlich zeigten einige Tübinger Professoren, wie sich die Debatte auch weniger weinerlich führen lässt (www.1000worte.de). Darin packt etwa der Erziehungswissenschaftler Klaus Prange den Stier bei den Hörnern. Richtig, sagt er, Kulturwissenschaften rechnen sich nicht, sie erbringen keine Leistung für den Wirtschaftsstandort Deutschland und ihr Weg in die öffentliche Irrelevanz ist mit Kürzungen und verfehlten Zumutungen gepflastert. Alles wahr. Aber es gebe unweigerlich einen Bedarf an Orientierung, Selbstaufklärung, ein Bedürfnis nach Selbstbewahrung und Selbstvergewisserung. Stichwort Weltkulturerbe: Dessen Konservierung werde nicht reichen, mahnt der Tübinger Geisteswissenschaftler, wenn nicht auch das Erinnern selbst kultiviert wird. „Sonst haben wir am Ende ein Weltkulturerbe ohne Erben.“



Neues Spektrum-Sonderheft: Unsere Biografie über Robert Koch zeigt, mit welchen genialen Ideen der Bakteriologe einst den Kampf gegen Milzbrand, Tuberkulose und Cholera aufnahm.

TITELBILD:

Galaxien sammeln sich entlang fadenartiger Strukturen im All. Der scheinbar leere Raum dazwischen ist für das Entstehen dieses kosmischen Netzes mitverantwortlich.

Grafik: Mark A. Garlick



TITELTHEMA: KOSMOLOGIE

Die Macht der kosmischen Leere

Seite 36

Selbst die endlosen Weiten zwischen den Galaxien sind nicht völlig frei von Materie. Sie bilden den Schauplatz für die Entwicklung großräumiger Strukturen im Universum.

EVOLUTION Seite 26

Madagaskar und die ersten Dinosaurier

Neue Fossilien aus Madagaskar zeigen: Dinosaurier entstanden viel früher als bisher angenommen. Außerdem lebten die ersten Säuger vielleicht gar nicht dort, wo Paläontologen sie bislang vermutet haben.



MEDIZIN Seite 46

Wege aus dem Organmangel

Spenderorgane sind oft die letzte Rettung, aber leider rar. Dennoch könnten innovative chirurgische Methoden und Änderungen der rechtlichen Grundlagen mehr Patienten zu einem zweiten Leben verhelfen.



ARCHÄOLOGIE Seite 56

Fischer in der Wüste

Die Atacama, eine Sand- und Felsenwüste, trennt Anden und Meer, nur gelegentlich von grünen Tälern unterbrochen. Und doch lebten Menschen dort schon vor etwa 10000 Jahren. Nahrung bot ihnen vor allem das Meer, und ihre Fertigkeiten als Fischer bestärken einige Archäologen in dem Glauben: Die ersten Siedler Südamerikas kamen in Booten.



LINGUISTIK Seite 64

Das große Sprachensterben

Tausende Sprachen werden bald verschwunden sein. Doch erst seit kurzem bemühen sich Linguisten, den kostbaren Schatz zu retten.

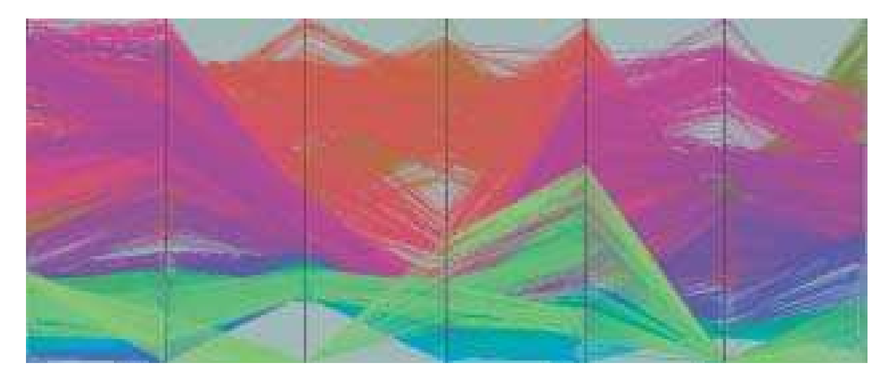




WAHRNEHMUNG Seite 74

Wenn Hände falsch fühlen

Ähnlich wie die Augen bei optischen geometrischen Täuschungen können sich auch Hände verschätzen. Manchmal macht der Tastsinn sogar die gleichen Fehler.



DATA MINING Seite 80

Tiefschürfen in Datenbanken

Data Mining bedeutet „Wissensentdeckung in Datenbanken“. Es ist die Kunst, in großen Datenmengen Unbekanntes zu entdecken.

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN


DIA MAX FPG / INTERNATIONAL

Die Lomborg-Kontroverse – August 2002

Bevölkerungswachstum – Lomborg ignoriert tief verwurzelte Einflüsse

Die Fruchtbarkeitsrate wird viel mehr von nirgendwo erwähnten Faktoren bestimmt als von den in der Literatur aufgeführten:

- durch die von Religionen aufgezwungenen Regeln, Zwänge und Verbote,
- durch kulturelle Überlieferungen und Ansehens-Zwänge,
- durch die wirtschaftliche Notwendigkeit von Kinderarbeit.

Achtzig Prozent der Weltbevölkerung unterliegen einem dieser tief verwurzelten Einflüsse. Dagegen sind Bildungsoffensiven nur sehr langfristige Maßnahmen. Lediglich das Aussterben der ideologischen Basis und deren Trägerschaft und die Ausmerzung der Armut können diese Faktoren wesentlich beeinflussen. Dazu sind aber nicht 48 Jahre, sondern Generationen oder Jahrhunderte, ebenso der Abbau des unbegrenzten Egoismus des Menschen im Allgemeinen notwendig. Es muss neben den Tagesproblemen die vornehmlichste und erste Aufgabe aller verantwortlichen Politiker und Religionsführer sein, ab sofort und für die Ewigkeit eine nachhaltige Bevölkerungspolitik zu betreiben. Die Erde soll ja auch nach dem Jahr 2050 möglichst als nie leer werdende Futterkrippe bestehen!

Etienne Jacob, Mammer, Schweiz

Überzeugende Datennachweise und Analysen

Ich finde Lomborgs Buch sehr gelungen. Es enthält die geordnete und überwältigende Fülle von Basisinformationen und Daten, die ich mir als statistische Grundlage zu Umweltfragen schon immer gewünscht habe.

Auch der Stil des Verfassers: durchaus sachlich, zurückhaltend, unpolemisch, und ganz und gar nicht rechthaberisch, so wie seine Kritiker; vor allem überzeugend, was seine Datennachweise und Analysen angeht. Dies gilt zumindest in den Teilen, in denen er sich mit den Untersuchungen der einzelnen Umweltthemen beschäftigt. Praktisch wird dort jeder Gedanke und jede Folgerung durch Verweise auf Untersuchungen und Veröffentlichungen auf Quellen belegt, die jedenfalls nicht aus den Ecken der Umweltverharmloser stammen.

Dass der Statistiker und Politologe im Vor- und Nachwort seine persönliche Meinung äußert und Wertungen anstellt, muss ihm wohl gegönnt sein in einer solchen bisher nicht gekannten Fleißarbeit auf dem Gebiet der Umweltproblematik, da er seine Ansichten ja auch dort mit Daten und Nachweisen eindrucksvoll und schlüssig untermauert.

Peter Jahn, Berlin

Häufiger Fehlalarm lässt abstumpfen

Ich bin fest entschlossen, den Umweltkassandras nur noch dann etwas abzunehmen, wenn sich ihre Prognosen durch harte Messdaten belegen lassen. Computermodelle, die bekanntlich immer wieder Modellfehler aufweisen und manchmal sogar interessengeleitet programmiert werden, genügen mir prinzipiell nicht mehr. Es ist wie mit der Alarmanlage auf dem Haus des Nachbarn: Wenn immer wieder Fehlalarm ausgelöst wird, nehme ich den Alarm nicht mehr ernst, unter Umständen selbst dann nicht, wenn tatsächlich einmal eingebrochen wird.

Reiner Vogels, Essen

Der Weltcomputer – Juni 2002

Das in Ihrem Artikel auf Seite 83 in der linken Spalte vorgestellte Beispiel bezüglich der Zugriffszeiten lässt den Flaschenhals-Effekt unberücksichtigt: Wenn Ankes Spielfilm aus 200 Fragmenten auf entsprechend vielen Computern mit 64-kB-Leitungen zusammengesetzt wird, resultiert daraus keineswegs eine Gesamtübertragungsrate von 10 Megabit. Denn wenn auch die einzelnen Fragmente sehr schnell auf dem Server zusammengestellt werden, können die Daten doch nur so langsam auf Ankes Rechner tröpfeln, wie es ihre eigene Netzverbindung zulässt – wenn das eine der 200 64-kB-Leitungen ist, hat sie überhaupt nichts gewonnen!

Dr. Andreas Fuß, Staufenberg

Mythos Unverwundbarkeit
Technoskop, Mai 2002

In der Verkehrswissenschaft wird das Phänomen, dass eine verbesserte Sicherheitsausstattung keinerlei oder wenig Verbesserung der Sicherheitslage erzeugt, durch den Begriff der Risikohomöostasis beschrieben. Es wird angenommen, dass das Individuum ein akzeptiertes Risikoniveau besitzt, das wahrgenommene Risiko mit diesem vergleicht und Abweichungen durch Verhaltensanpassungen ausgleicht.

Sicherheitsmaßnahmen im Straßenverkehr verändern meist nur das wahrgenommene Risiko, nicht aber das akzeptierte. Die TU Dresden hat mit Unterstützung der Alexander-von-Humboldt-Stiftung und der DFG elf Jahre auf diesem Gebiet geforscht. Ganz so einfach wie dargestellt ist die Lage nicht. Neben der genannten Homöostasis im engeren Sinne existiert auch eine im weiteren, eine Risikoverlagerung und eine Risikosubstitution. Um diese zu erfassen, müssen Unfallmodelle aufgebaut werden, die mindestens drei Niveaus einbeziehen, nämlich a) die Verkehrsnachfrage, b) bei gegebener Nachfrage die Unfallhäufigkeit und c) bei gegebener Unfallhäufigkeit die Unfallschwere.

Prof. Ulrich Blum, Dresden

„Weltmeister aller Klassen"
Forschung und Gesellschaft, September 2002

Im Artikel wird in Zusammenhang mit dem Internationalen Experimentalreaktor Iter, dem nächsten großen Schritt der weltweiten Fusionsforschung, behauptet, Deutschland solle von den auf 3,5 Milliarden Euro veranschlagten Investitionskosten „den größten Teil übernehmen". Obwohl die Kostenaufteilung von den internationalen Partnern – Europa, Japan und Russische Föderation – noch nicht beschlossen ist, ist diese Feststellung mit Sicherheit unzutreffend. Europa und nicht Deutschland – als lediglich eines unter den zahlreichen im Europäischen Fusionsprogramm zusammengeschlossenen europäischen Ländern – ist Vertragspartner der Iter-Zusammenarbeit, unter denen die Kosten aufgeteilt werden. Falls die USA als vierter Partner in die Iter-Kooperation zurückkehren, was immer wahrscheinlicher wird, wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die beteiligten Nationen noch günstiger.

Isabella Milch, Garching

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Die Mär vom Jungbrunnen – August 2002

Genetische Steuerung

Im Artikel wird behauptet, es existiere für das Altern kein genetisches Programm. Eine Auslese spezieller Gene … würden die Mechanismen der Evolution gar nicht zulassen.

Das ist in dieser Allgemeinheit falsch. Zwei Gründe seien angeführt, warum sich eine Steuerung der Alterung bevorzugt vererbt.

1. Wenn die ältere Generation nach der reproduktiven Phase ihren Nachkommen das Futter wegfrisst, benachteiligt sie die eigene Nachkommenschaft, und damit die Verbreitung der eigenen Gene.
2. Für die effiziente evolutionäre Entwicklung ist es notwendig, dass die Generationswechsel schnell hintereinander erfolgen. Damit können Anpassungen schneller realisiert werden. Daher ist bei den Lebewesen die reproduktive Phase normalerweise kürzer, als es auf Grund der altersbedingten Funktionsstörungen sein müsste.

Es ist also durchaus anzunehmen, dass eine genetische Steuerung den Alterungsprozess mitsteuert.

Dr. Markus Messner, Biedermannsdorf, Österreich

Solide Basis

Die wissenschaftliche Basis zu Gunsten einer seriösen High-Tech-Anti-Aging-Medizin ist solider, als es Olshansky et al. als, nota bene, Nicht-Kliniker und Nicht-Anwender von Longevity Drugs, also Mitteln zur Langlebigkeit (Vitamine, Mineralstoffe, Spurenelemente, hochwertige Phytosupplements, Aminosäuren, Omega-3-Fettsäuren, Hormone und Pro-Hormone) annehmen. Sie stellen überdies in ihrem Essay nicht die Komplexität der Lebenswirklichkeit dar und erhalten gerade deswegen in Science (Vol. 296, 2002) eine verdiente Antwort.

Die nichts sagende Phrase „Dagegen können solche Produkte (Anm. Longevity Drugs) durchaus schaden“ von Olshansky et al. gehört nicht in einen ambitionierten Essay. Personen mit erhöhtem Plasma-Homocystein, die von koronarer Herzkrankheit und Thrombose betroffen sind, werden so von der Einnahme von B-Vitamin-Supplements abgehalten, obwohl sie in Wirklichkeit davon profitieren würden (N. Engl. J. Med., Nr. 22, 2001).

Dr. med. M. P. Look, Bonn



Diesen Spiegel (abgebildet ist die Rückseite) fanden Archäologen in einem skythischen Grabhügel.

In Sibiriens Tal der Könige
August 2002

Ich muss Ihnen zu Ihrem Artikel über die Skythen gratulieren. Ich – als interessierter Laie und Nicht-Archäologe – habe mehr Kenntnisse daraus entnommen und mehr Verständnis über die geheimnisvollen Skythen gewonnen als aus einem Skythen-Artikel der Zeitschrift „Archäologie in Deutschland“. Besonders die kühne, unkomplizierte und doch klare Karte, die fast alle im Text genannten geografischen Orte enthält und – mit modernen Ortsbezeichnungen – die Orientierung mühelos erlaubt, ist ein Gewinn für den Artikel. Begriffe wie „thrakischer Balkan-Donau-Raum“ geben auch einer geografisch wenig gebildeten Genetikerin sofort eine klare Vorstellung vom Ort der Ereignisse. Insgesamt eine geschickte und sprachlich zum Teil sogar richtig schöne Zusammenstellung von alter und neuerer Geschichtsschreibung, von Archäologie, Geologie und Völkerwanderungsströmen, von mythologischen Skizzen, von Riten und Gebräuchen der Völker und Stämme dieser Kulturkreise – bis hin zu Hinweisen zum heutigen Klima. Es hat Spaß gemacht, zu lesen und hin und her zu blättern – endlich einmal nicht nur Stoff zum medienwirksamen „Goldschatz der Skythen“.

Dr. F. Süss, Regensburg

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Elisabeth Hamel, Andrea Jungbauer, Dr. Frank Scholz.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

SEHVORGANG

Live beobachtet: der Richtungsdetektor im Auge

Schon in der Netzhaut erkennen einzelne Zellen die Richtung, in der sich ein Objekt im Sichtfeld bewegt. Mit einem trickreichen Mikroskop konnten Forscher jetzt erstmals verfolgen, wie sie diese Aufgabe erledigen.

Von Imke Ortmann

Vergleiche sollen das Verständnis fördern, sind aber oft unzulänglich oder irreführend: Sie hinken, wie die gängige Floskel besagt. Das gilt auch für das verbreitete Bild, wonach die Netzhaut im Auge die Rolle des Films in einer Fotokamera spielt. Damit wird die Retina, wie die lichtempfindliche Gewebeschicht an der hinteren Innenseite des Augapfels fachsprachlich heißt, auf einen bloßen Detektor reduziert. Sie kann aber viel mehr: Wie ein hochspezialisierter Prozessor analysiert sie das aufgefangene Bild bereits grob und gewinnt dabei zeitliche, räumliche und farbliche Informationen.

Eine grundlegende Fähigkeit beim Sehen ist das Erkennen von Bewegung und deren Richtung. Nur dadurch kann beispielsweise ein Frosch rechtzeitig zuschnappen, wenn eine Fliege in seine Nähe gerät, oder ein Tennisspieler früh genug reagieren, um mit dem Schläger den ankommenden Ball zu treffen. Dabei leistet die Netzhaut wichtige Vorarbeit. Bereits 1964 fand ein Forscherteam an der Universität Cambridge unter den so genannten Ganglienzellen in der Retina solche, die nur dann feuern, wenn ein Lichtmuster sich in eine bestimmte Richtung bewegt. Von ihnen erhält das Gehirn offenbar schon Informationen über die Bewegungsrichtung eines Objektes im Sichtfeld.

Zellen beim Rechnen zusehen

Doch wo und wie stellt die Netzhaut die dafür erforderlichen Kalkulationen an? Errechnen die Ganglienzellen selbst aus richtungsspezifischen Reizeingängen ein Richtungssignal oder erhalten sie von anderen, vorgeschalteten Nervenzellen bereits die fertige Richtungsinformation?

Als Zuträger, die eine solche Vorabverarbeitung leisten könnten, standen schon länger andere retinale Zellen im Verdacht, von denen man weiß, dass sie Signale an die richtungsselektiven Ganglienzellen weiterleiten. Diese so genannten *Starburst*-Amakrinzellen sehen sehr ungewöhnlich aus. Ihre Dendriten – eine bestimmte Art von Nervenzellfortsätzen – sind hochsymmetrisch angeordnet: Vier bis sechs Primärdendriten führen vom Zellkörper aus in alle Richtungen und spalten sich dann in viele dünne, sekundäre Verästelungen auf. Damit erinnern die Zellen ein wenig an einen explodierenden Stern, was ihnen ihren Namen eingebracht hat.

THOMAS EULER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE FORSCHUNG IN HEIDELBERG

Die *Starburst*-Zellen der Netzhaut zeichnen sich durch vielfach verzweigte dendritische Fortsätze aus, die hochsymmetrisch angeordnet sind. Hier ist eine einzelne *Starburst*-Zelle (rot) im Netzhautgewebe durch künstliches Anfärben hervorgehoben. Die großen runden Kreise (blau) sind nachgeschaltete Ganglienzellen. Ihre gebündelten Axone (Ausgangsfasern), die als gestreifte Bänder (grün) erscheinen, ziehen zur Austrittsstelle des Sehnervs im Auge.

Sind sie tatsächlich der Ort der Richtungsverarbeitung in der Netzhaut? Die Beantwortung dieser Frage scheiterte lange daran, dass es keine geeignete Untersuchungsmethode gab.

Im Regelfall führt man an Nervenzellen elektrophysiologische Ableitungen durch, indem man Elektroden einsticht und Potenzialänderungen an der Zelloberfläche misst. Diese Methode ist bei den *Starburst*-Zellen aber ungeeignet. Potenzialmessungen am Zellkörper (dem annähernd kugelförmigen „Rumpf" der Zelle) zeigen keinerlei Richtungsselektivität auf bewegte Lichtreize. Das ist angesichts der Morphologie dieser Neuronen auch kaum verwunderlich, da sie – wie übrigens die meisten Amakrinzellen – keine „Ausgangsleitung" (kein Axon) besitzen, über die sie ein integriertes elektrisches Signal weiterleiten könnten. Sinnvoller erscheinen Messungen an den Dendriten. Sie scheitern aber daran, dass die feinen Fortsätze mit nur einem Mikrometer Durchmesser einfach zu dünn sind, als dass Mikroelektroden eingestochen werden könnten.

Doch nun haben Wissenschaftler um Thomas Euler vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg und von der Universität Washington mit einem trickreichen bildgebenden Verfahren einen eleganten Ausweg aus dem Dilemma gefunden. Sie verwendeten für ihre Untersuchungen die so genannte Multi-Quanten-Mikroskopie. Diese erlaubt es, Änderungen der Calcium-Konzentration in einzelnen Dendriten der *Starburst*-Zellen, die durch bewegte Lichtreize hervorgerufen werden, an der lebenden, weiterhin lichtempfindlichen Retina live zu verfolgen.

Ein Anstieg dieser Ionenkonzentration zeigt indirekt an, dass eine Nervenzelle dabei ist, ein Signal abzugeben. Neuronen kommunizieren an speziellen Kontaktstellen, so genannten Synapsen, über chemische Botenstoffe miteinander. Calcium-Ionen spielen dabei eine Schlüsselrolle, da sie sich an bestimmte Proteine binden, die daraufhin die Ausschüttung der Botenstoffe einleiten. Ein Anstieg der Calcium-Konzentration in den Synapsen ist demnach ein Indiz dafür, dass gerade eine Erregungsweiterleitung stattfindet. Bei den *Starburst*-Zellen finden sich Ausgangssynapsen – sie können nur Signale an andere Zellen aussenden, aber keine empfangen – ausschließlich an den Rändern des Dendritenbaums. Daher wählten die Max-Planck-Forscher und ihr amerikanischer Kollege vor allem dort die mikroskopischen Beobachtungspunkte.

Die verwendete Multi-Quanten-Mikroskopie nutzt wie die herkömmliche konfokale Mikroskopie das Prinzip des Nachweises von Fluoreszenz. Aus einem Kaninchenauge wird zunächst die Retina isoliert, die sich in einer mit Sauerstoff versorgten Nährlösung bis zu zwölf Stunden am Leben erhalten lässt. Dann spritzt man über eine Mikroelektrode in einzelne *Starburst*-Zellen einen Indikator ein, der nach der Bindung von Calcium-Ionen intensiver fluoresziert. So lässt sich ein Anstieg der lokalen Calcium-Konzentration unter dem Mikroskop sehr einfach verfolgen: Die betreffenden Fortsätze leuchten bei Bestrahlung mit Laserlicht geeigneter Wellenlänge intensiver.

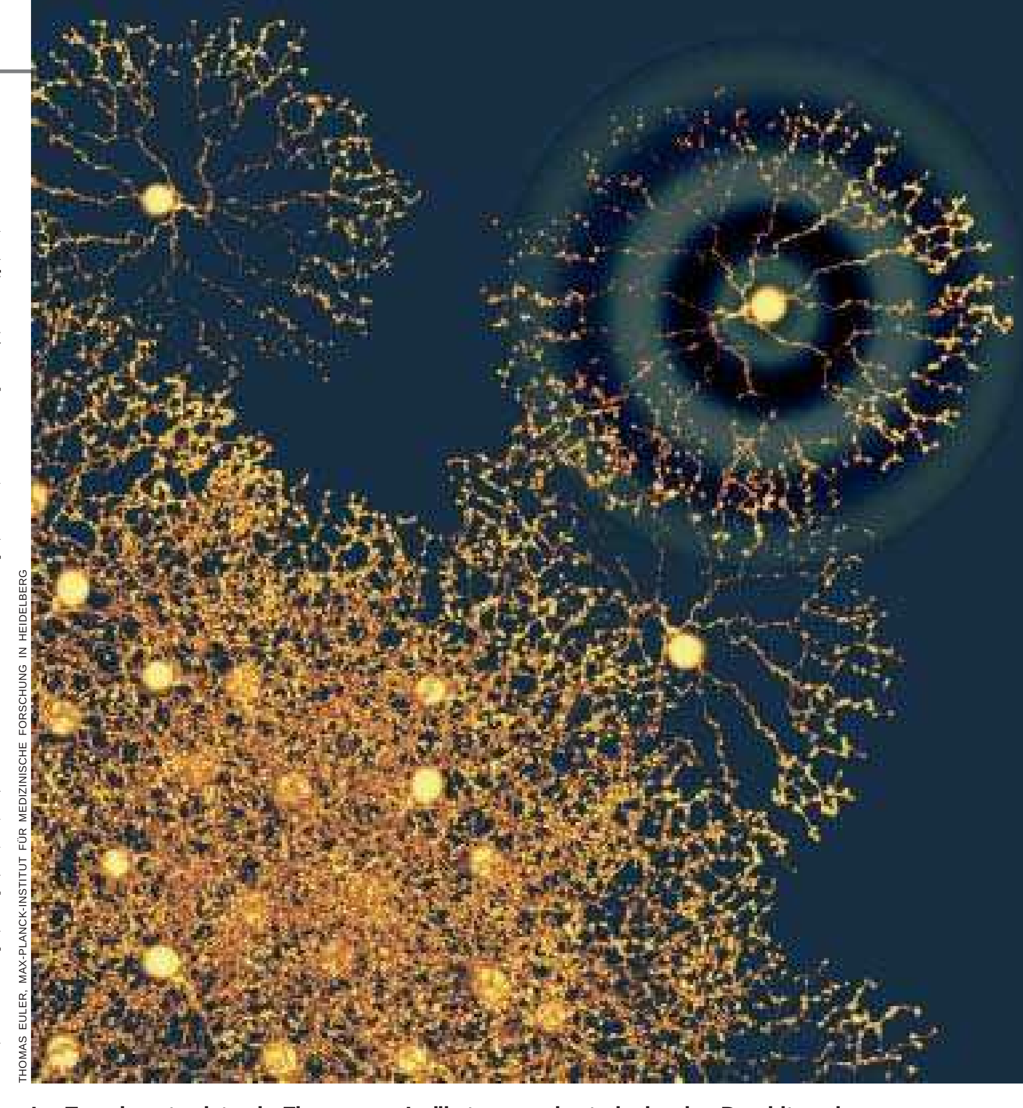
Trickreiche Anregung im Doppelpack

Ausgesprochen trickreich wird die Multi-Quanten-Mikroskopie aber durch die besondere Art der Anregung des Indikatormoleküls. Üblicherweise dient dazu ein einzelnes energiereiches Photon. Bei dem neuen Verfahren müssen dagegen zwei Lichtquanten, die jeweils nur den halben Energiebetrag mitführen, beim Indikator zusammentreffen und gemeinsam von ihm absorbiert werden – daher auch der Name Multi-Quanten-Mikroskopie.

Ein großer Vorteil dabei ist, dass die beiden Photonen wegen ihrer geringeren Energie aus dem Infrarotbereich stammen; ihre Wellenlänge liegt bei 930 Nanometern. Deshalb regen sie die Photorezeptoren in der Netzhaut, die auf sichtbares Licht zwischen 400 und 700 Nanometern ansprechen, nicht an. Die Retina bleibt somit für Licht des sichtbaren Spektrums empfänglich – eine Grundvoraussetzung, wenn man die Verarbeitung von visuellen Reizen untersuchen will. Dagegen würde sie von dem – im konventionellen Konfokalmikroskop verwendeten – sichtbaren Laserlicht, bei dem je ein energiereiches Photon ein Indikatormolekül anregt, binnen Sekunden geblendet.

Das Multi-Quanten-Prinzip bringt einen weiteren Vorteil: Fluoreszenz entsteht allein im Fokus, weil nur dort die Photonendichte so hoch ist, dass zwei Lichtquanten gleichzeitig auf ein und dasselbe Farbstoffmolekül treffen und es anregen. Dadurch wird eine unerwünschte Fluoreszenz außerhalb des Brennpunktes vermieden. Eine Lochblende am Detektor wie beim Konfokalmikroskop, um Unschärfe verursachendes Streulicht abzufangen, ist nicht mehr nötig, und das gesamte Fluoreszenzlicht aus der Probe lässt sich zur Abbildung nutzen.

Mit dieser ausgefeilten Technik konnten die Forscher die fast vierzig Jahre alte Frage, wo die Bewegungsrichtung in der Netzhaut festgestellt wird, endlich beantworten. In ihren ersten Experimenten stimulierten sie *Starburst*-Zellen lokal durch einen Lichtreiz in Form eines Tortenstücks, dessen Spitze im Zentrum der Zelle lag. Dabei zeigte sich, dass die Calcium-Konzentration nur in den Dendriten innerhalb des „Tortenstücks“ anstieg. Demnach können die Fortsätze lokal und damit unabhängig voneinander auf einen Lichtreiz reagieren.



THOMAS EULER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE FORSCHUNG IN HEIDELBERG

Im Experiment zeigte ein Fluoreszenz-Indikator an, wie stark einzelne Dendriten einer *Starburst*-Zelle durch Lichtreize unterschiedlicher Bewegungsrichtung aktiviert wurden. In dieser Fotomontage ist rechts oben eine solche Zelle zusammen mit einem Lichtreiz dargestellt, bei dem ein heller Kreis periodisch vom Zellkörper nach außen läuft. Sie wurde links unten vielfach übereinander kopiert, um die dichte Anordnung der *Starburst*-Zellen und das verworrene Geflecht ihrer Dendriten zu illustrieren.

Als Nächstes stimulierten die Forscher die *Starburst*-Zellen mit Lichtmustern, die über die gesamte Zelle wanderten. Dabei traten die Calcium-Signale in den Dendriten nur auf, wenn sich das Signal in einer ganz bestimmten Richtung bewegte. Die Analyse der Fluoreszenz-Intensität machte deutlich, dass jeder Dendrit jeweils auf eine andere Orientierung des bewegten Musters besonders stark reagiert. Folglich vereint ein und dieselbe *Starburst*-Zelle mehrere Richtungsdetektoren in sich. Bei genauerer Betrachtung der Richtungspräferenzen zeigte sich, dass alle Fortsätze bevorzugt auf zentrifugale Lichtreize ansprechen, das heißt auf solche, die vom Zellkörper nach außen laufen.

Erstmals wurde damit bewiesen, „dass die Information, wohin sich ein Objekt in unserem Sichtfeld bewegt, bereits eine Stufe vor den Ganglienzellen errechnet wird“, so Euler. Wie das im Einzelnen geschieht, ist zwar noch unklar. Auf jeden Fall jedoch erklären die beschriebenen Befunde, warum bei elektrophysiologischen Messungen am Zellkörper der *Starburst*-Zelle keine richtungsspezifischen Reaktionen gemessen wurden: Von dort aus gesehen, heben sich die Signale aus den Dendriten wegen ihrer unterschiedlichen Richtungspräferenzen gegenseitig auf.

Wie eingangs erläutert, bewirkt die lokale Erhöhung der Calcium-Konzentra- ▶

tion an den Enden einzelner Dendriten, dass die dortigen Ausgangssynapsen mit großer Wahrscheinlichkeit Botenstoffe (Neurotransmitter) ausschütten, die die nachgeschaltete Ganglienzelle modulieren. Welche das genau sind, ließ sich zwar noch nicht ermitteln. Man weiß jedoch, dass *Starburst*-Zellen sowohl den aktivierenden Neurotransmitter Acetylcholin als auch das hemmende GABA (Gamma-Aminobuttersäure) enthalten und ausschütten. Eine dieser Substanzen oder auch beide dürften demnach an der Weitergabe des Richtungssignals an die Ganglienzelle beteiligt sein. Diese setzt die empfangene Information dann in eine Folge von Aktionspotenzialen um und leitet sie über den optischen Nerv an die visuellen Zentren im Gehirn weiter.

Genauer zu erforschen ist auch noch das Verknüpfungsmuster zwischen *Starburst*- und Ganglienzellen. Es muss sehr exakt festgelegt sein. Damit die Ganglienzellen richtungsselektiv reagieren können, dürfen sie nämlich nur von Richtungsdetektoren Signale erhalten, die für eine Orientierung spezifisch sind. Anderenfalls würden diese sich gegenseitig auslöschen. Und wie die Natur während der Embryonalentwicklung ein derart komplexes Verknüpfungsmuster zwischen Nervenzellen anlegt, ist eine weitere spannende Frage. ■

__Imke Ortmann__ hat Biologie und Chemie studiert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Münster.

NANOTECHNOLOGIE

Kaltes Glühen

Ein dreidimensionales Gitter aus winzigen Wolframstäben sendet beim Erhitzen kaum Wärmestrahlung aus, dafür umso mehr kurzwelligeres Licht – und verspricht so eine neue Generation energieeffizienter, umweltfreundlicher Glühbirnen.

Von Stefan Maier

Glühbirnen produzieren nicht nur Licht, sondern auch eine Menge Wärme – wie jeder weiß, der sich schon einmal die Finger daran verbrannt hat. Tatsächlich sind sie geradezu erschreckende Energieverschwender: Bei einer Effizienz von nur fünf bis zehn Prozent vergeuden sie mehr als neunzig Prozent der elektrischen Energie als infrarote Wärmestrahlung mit Wellenlängen von einigen Mikrometern (millionstel Metern). Gleiches gilt für die moderneren Halogenlampen, und selbst Fluoreszenzröhren wandeln nur etwa dreißig Prozent des Stroms in sichtbares Licht um.

Da rund ein Drittel der weltweit verbrauchten Elektrizität zur Beleuchtung dient, würden deutlich effizientere Lichtquellen einen enormen Beitrag zum Energiesparen leisten. Zu den aussichtsreichsten Kandidaten zählen Leuchtdioden auf Basis von Halbleitermaterialien, die Lichtausbeuten bis fünfzig Prozent erreichen. Allerdings sind weiße Leuchtdioden immer noch ziemlich teuer.

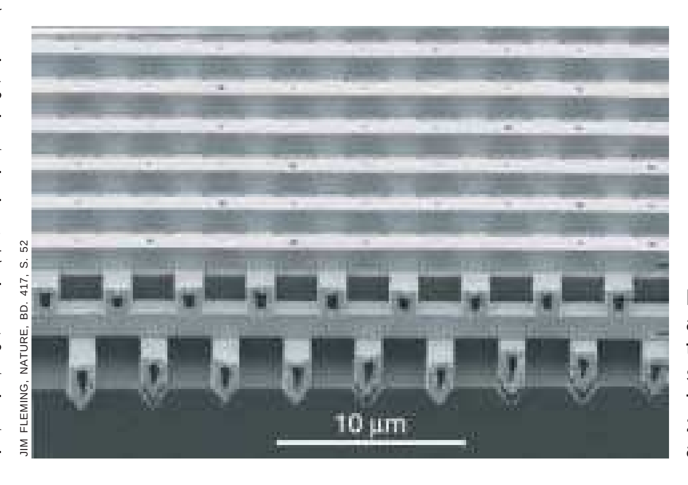
Ein Forscherteam um Jim Fleming von den Sandia-Nationallaboratorien in Albuquerque (New Mexico) hat nun einen völlig anderen Weg zu effizienteren Lampen eingeschlagen – zurück zur klassischen Glühbirne mit ihrem Wolframfaden, der sich auf mehr als tausend Grad Celsius erhitzt (*Nature, Bd. 417, S. 52*). An die Stelle des althergebrachten, spiralförmig gewundenen Drahtes tritt allerdings ein viel raffinierteres Gebilde: ein „photonischer" Kristall mit ganz spezieller geometrischer Struktur.

Solche Kristalle bilden das optische Gegenstück zu Halbleitern. Wie diese besitzen sie eine Bandlücke: einen verbotenen Energiebereich. Während er bei Halbleitern für Elektronen unzugänglich ist, bleiben bei photonischen Kristallen allerdings Lichtquanten daraus verbannt. Photonen der entsprechenden Energie können daher weder absorbiert noch ausgesandt werden. Über die geometrische Struktur des Kristalls lässt sich die optische Bandlücke gezielt einstellen. Platziert man sie in der Infrarotregion, wird die Aussendung von Wärmestrahlung unterdrückt. Glühbirnen mit einem derartigen Kristall sollten also kaum noch Energie in diesem Spektralbereich verschwenden. Dadurch könnten sie eine Effizienz von über sechzig Prozent erreichen – gut das Zehnfache derjenigen herkömmlicher Wolframbirnen.

Obwohl dieser Trick zur Herstellung kalter Glühbirnen nahe liegt, hat ihn bis vor kurzem niemand wirklich praktisch ausprobiert. Das liegt unter anderem daran, dass es immer noch ein kleines Kunststück ist, photonische Kristalle mit einer gewünschten inneren Struktur zu erzeugen. Außerdem lässt sich nicht von vorneherein sagen, was mit dem Energieanteil geschieht, dessen Abgabe als Wärmestrahlung blockiert wird. Kommt er überhaupt dem sichtbaren Spektralbereich zugute, sodass die Glühbirne tatsächlich heller leuchtet?

Photonische Kristalle enthalten gewöhnlich ein periodisches Gitter aus zwei Stoffen mit stark unterschiedlichem Brechungsindex. Licht breitet sich in den beiden Materialien unterschiedlich schnell aus. Man stelle sich etwa einen Glasblock vor, der mit winzigen, regelmäßig angeordneten Luftlöchern durchsetzt ist. Elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge mit der Gitterperiode dieses „Kristalls" vergleichbar ist, wird in ihm so stark gestreut, dass es sich praktisch nicht darin fortbewegen kann. So entsteht die photonische Bandlücke.

Um eine solche Struktur zu erhalten, betrieben Fleming und seine Kollegen einigen Aufwand. Zunächst erzeugten sie mit erprobten lithografischen Verfahren der Halbleitertechnik Schichten aus Siliziumdioxid, in die Siliziumstäbchen von



JIM FLEMING, NATURE, BD. 417, S. 52

Liefert dieses Gitter aus 1,2 Mikrometer dicken Wolramstäben das Vorbild für Glühdrähte mit zehnfacher Lichtausbeute?

etwa einem halben Mikrometer Durchmesser in Abständen von vier Mikrometern parallel nebeneinander eingebettet waren. Diese Schichten wurden, jeweils um 90 Grad verdreht, in vier Ebenen zu einem etwa sechs Mikrometer hohen Block übereinander gestapelt (Bild). Anschließend lösten die Forscher das Silizium durch ein Ätzverfahren heraus und füllten die Löcher mit Wolfram. Im letzten Schritt wurde schließlich auch das Siliziumdioxid weggeätzt.

Wärme wird in Licht verwandelt

Zurück blieb ein regelmäßiges Gerüst aus Wolframstäben und Luft, das als photonischer Kristall wirkt. Seine „Gitterkonstante" war gerade so bemessen, dass eine Bandlücke für elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen sechs und zwanzig Mikrometern entstehen sollte.

Genau das fanden die US-Forscher bestätigt: Egal aus welcher Richtung sie einen Infrarotstrahl auf den Kristall richteten – er konnte sich nicht darin ausbreiten und wurde reflektiert. Damit war der experimentelle Beweis erbracht, dass sich die Wärmeproduktion eines Wolfram-Glühfadens stark reduzieren lässt, wenn er nur geeignet strukturiert wird.

Noch aufregender war jedoch eine weitere Beobachtung: Zur großen Freude des Forscherteams enthielt der Kristall direkt neben der verbotenen Zone – bei fünf bis sechs Mikrometern – einen Bereich, in dem er elektromagnetische Strahlung ungewöhnlich stark absorbierte. Die Ursachen dieses Effektes sind noch nicht völlig geklärt; doch scheint die Erniedrigung der Lichtgeschwindigkeit am Rand der Bandlücke eine wichtige Rolle zu spielen.

Nun kann nach einem grundlegenden physikalischen Gesetz der Optik ein Absorptionsband stets zugleich als Emissionskanal dienen. Seine Existenz in dem photonischen Kristall der US-Forscher öffnet also eine Art Auslassventil für die Energie der unterdrückten Wärmestrahlung. Sie wird hochtransformiert und bei kürzeren Wellenlängen, also näher am sichtbaren Spektralbereich, abgegeben.

Das Faszinierende daran: Es ist prinzipiell möglich, dieses Emissionsband durch Anpassung der Kristallgeometrie in den sichtbaren Spektralbereich zwischen 400 und 750 Nanometern zu verschieben. Dazu müssen die Wolframstäbe nur näher zusammengerückt werden. Der Kristall würde dann beim Erwärmen auf etwa 1500 Grad Celsius kaum Wärme abstrahlen, da dieser Vorgang durch die Bandlücke unterdrückt ist, und dafür umso mehr sichtbares Licht aussenden.

Ob und wann Glühbirnen aus photonischen Kristallen industriell hergestellt werden können, ist noch offen – muss doch zunächst die Kristallgeometrie so modifiziert werden, dass das Emissionsband in den sichtbaren Spektralbereich rückt. Außerdem ist der Herstellungsprozess noch zu kompliziert und aufwendig. Dennoch demonstriert die Pionierleistung des Sandia-Teams das enorme Potenzial des *electromagnetic engineering* – der Schaffung von Materialien mit genau definierten optischen Eigenschaften. Photonische Kristalle dienen bereits in der Telekommunikation zur Übertragung von Signalen sowie in Mobiltelefonen zur Verbesserung der Empfangsqualität. Wetten, dass sie sich einst auch in Ihrer Nachttischlampe finden? ■

Stefan Maier *promoviert am California Institute of Technology in Pasadena in angewandter Physik.*

GEWINNSPIEL

SPIELTHEORIE

Entscheidung unter Unsicherheit

Machen Sie lieber mit einem unsicheren Partner ein Projekt mit bekanntem Gewinn oder allein ein Geschäft mit ungewissem Profit? Nennen Sie uns Ihre Entscheidungsmaximen und ernten Sie – mit Glück – die Früchte des Handelns, das daraus folgt.

Von Antonio Cabrales und Rosemarie Nagel

Die Situation kommt im Alltag in den verschiedensten Formen vor: Zwei Leute haben die Möglichkeit, ein Projekt zu realisieren, das einen hohen Gewinn verspricht – allerdings nur, wenn beide sich engagieren und das Vorhaben bis zum Ende durchziehen. Soll man sich auf eine so unsichere Sache einlassen?

In unserem Fall kommt erschwerend hinzu, dass die beiden potenziellen Partner vor ihrer Entscheidung nicht wissen, ob der andere mitmachen wird, ja dass sie ihn nicht einmal kennen. Die Alternative wäre, für sich allein das bisherige Geschäft weiterzubetreiben; das bringt jedoch vielleicht nicht so viel ein.

Was von beidem günstiger ist, lässt sich im Vorhinein nicht genau sagen und wird von den Beteiligten möglicherweise unterschiedlich eingeschätzt. Vielleicht glaubt der eine mit *business as usual* besser abzuschneiden. Der andere dagegen ist überzeugt von dem Projekt, investiert – und steht am Ende mit leeren Händen da, weil der Partner nicht, wie erhofft, mitgezogen hat. Sollte man unter diesen Umständen vielleicht doch besser den Spatz in der Hand der Taube auf dem Dach vorziehen?

Wie in dem „Zahlenwahlspiel“, das wir im November 1997 in dieser Zeitschrift (S. 23) ausgeschrieben haben (die Diskussion der Ergebnisse erschien im Februar 1998, S. 16), geht es nicht nur um die „Realität“, sondern auch darum, wie die unbekannten anderen den Sachverhalt einschätzen. Um die wesentlichen Aspekte eines komplexen Problems klar herauszuarbeiten, setzt die Wirtschaftsforschung – wie andere Disziplinen auch – an die Stelle der unübersichtlichen Wirklichkeit gerne vereinfachte, abstrakte Szenarien. Man kennt sie aus der mathematischen Spieltheorie; das bekannte Gefangenendilemma und das Ultimatum-Spiel (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52) sind nur zwei von vielen Beispielen.

Hier wollen wir Ihnen nun ein neues Spiel aus dieser Klasse vorstellen. Die zahlreichen Handlungsalternativen der Realität sind auf zwei reduziert: Ein Spieler kann nur *A* wie Alleingang oder *P* wie Projekt sagen. Dabei ist der Gewinn aus dem Projekt *P* (wenn es zu Stande kommt) bekannt; für den zu erwartenden Gewinn aus dem Alleingang *A* erhält der Spieler dagegen nur eine ungefähre Prognose.

Damit hat er die Wahl zwischen zwei Alternativen, die beide mit Unsicherheit

Die Spielregeln

An dem Spiel sind zwei Parteien beteiligt: Sie und ein Partner, den Sie nicht kennen und dem Sie nie wieder begegnen werden. Es geht also nicht um den Aufbau einer vertrauensvollen Beziehung (das war Thema des Artikels im März-Heft 2002, S. 52), sondern nur um die Maximierung des Gewinns (der „Auszahlung“). Sie und Ihr Partner haben die Wahl zwischen den Spielzügen *A* (Alleingang) und *P* (gemeinsames Projekt). Je nach dieser Wahl ergeben sich die Auszahlungen nach folgender Tabelle (der „Auszahlungsmatrix“):

Sie entscheiden	Ihr Partner entscheidet	Ihre Auszahlung	Auszahlung ihres Partners
A	A	X	X
A	P	X	0
P	A	0	X
P	P	80	80

Wer sich also für den Alleingang *A* entscheidet, bekommt *X* Euro, unabhängig von der Entscheidung des anderen. Wenn beide das Projekt *P* wählen, erhalten beide 80 Euro. Wer auf *P* setzt, während der andere *A* spielt, hat Pech gehabt (Auszahlung 0). Mit den Auszahlungen ist das Spiel beendet.

Wenn das Gemeinschaftsprojekt (beide wählen *P*) zu Stande kommt, ist dessen Ertrag sicher. Dagegen ist der Wert *X*, der angibt, wie viel der Alleingang *A* einbringen wird, nicht genau bekannt; sagen wir, er hängt von dem Dollarkurs ab, der in einem halben Jahr gültig ist. Die möglichen Beträge sind 50, 60, 70, 80 oder 90 Euro. Immerhin bekommen beide Spieler eine Gewinnprognose. Das ist ein Hinweis, aus dem sich der Wert *X* mit einer Unschärfe von 10 Euro nach folgender Tabelle erschließen lässt.

Gewinnprognose	Auszahlung X
schwach	50 oder 60
durchwachsen	50 oder 60 oder 70
mäßig	60 oder 70 oder 80
gut	70 oder 80 oder 90
hervorragend	80 oder 90

Im Einzelnen verläuft das Spiel so: Ein Computerprogramm wählt für den Auszahlungsbetrag *X* per Zufall einen der fünf Werte 50, 60, 70, 80 oder 90 Euro, jeweils mit derselben Wahrscheinlichkeit. Dieser Betrag gilt für Sie und Ihren Partner gleichermaßen, wird Ihnen aber nicht mitgeteilt. Stattdessen erhalten Sie eine Prognose, die in einem zweiten Schritt – wiederum per Zufall und mit gleichen Wahrscheinlichkeiten – aus dem Sortiment der für diesen *X*-Wert gültigen Prognosen gezogen wird, und das für jeden Spieler getrennt:

Wert X	Prognose
50	„durchwachsen“ oder „schwach“
60	„mäßig“ oder „durchwachsen“ oder „schwach“
70	„gut“ oder „mäßig“ oder „durchwachsen“
80	„hervorragend“ oder „gut“ oder „mäßig“
90	„hervorragend“ oder „gut“

Obwohl also der Wert von *X* für beide derselbe ist, können Sie und Ihr Partner abweichende Gewinnprognosen bekommen; vielleicht vertrauen Sie ja verschiedenen Analysten, die jeweils zu einer anderen Einschätzung kommen.

Unter welchen Umständen ist es vorteilhafter, *A* zu spielen, und in welcher Situation ist die Entscheidung *P* günstiger? Wenn Sie an unserem Spiel teilnehmen wollen, geben

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

behaftet sind: Wählt er den Alleingang, weiß er nicht genau, wie viel ihm das einbringen wird; entscheidet er sich dagegen für das Projekt, bleibt er im Unklaren, ob sein Partner mitzieht. Welche Unsicherheit ist ihm lieber?

Wir bitten Sie nun nicht etwa, ein Spiel gegen einen konkreten Partner zu spielen, sondern sich eine allgemeine Strategie zurechtzulegen. Dazu sollten Sie uns für jede mögliche Prognose des Gewinns aus dem Alleingang angeben, was Sie tun würden (Kasten unten). Unter allen eingesandten Strategien losen wir acht aus und lassen sie in vier Paaren gegeneinander spielen. Die Auszahlungsbeträge, die sich dabei ergeben, gehen in Euro an die Einsender der entsprechenden Strategien.

In einem späteren Artikel werden wir die Ergebnisse und Hintergründe dieses Experiments beschreiben und die Gewinner bekanntgeben. ■

Antonio Cabrales *und* **Rosemarie Nagel** *betreiben Spieltheorie und experimentelle Wirtschaftsforschung an der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Pompeu Fabra in Barcelona.*

Sie für jede mögliche Prognose (hervorragend, gut, mäßig, durchwachsen oder schwach) Ihre Entscheidung (*A* oder *P*) an, also eine komplette „Strategie“.

Für jedes der vier Paare von Strategien, die wir per Zufall aus allen Einsendungen auswählen, wird der Computer per Zufall ein *X* bestimmen und ebenfalls per Zufall zu diesem *X* für jeden der beiden Partner einen zulässigen Hinweis auswählen. Je nach der Entscheidung, welche die Spieler in ihren Strategien für diese Hinweise festgelegt haben, ergeben sich ihre Auszahlungen aus der Auszahlungsmatrix.

Teilen Sie uns außer Ihrer Strategie Ihre Adresse mit und, wenn Sie wollen, auch Ihr Alter, Ihr Geschlecht und Ihren Beruf. Wir sind überdies sehr daran interessiert, dass Sie uns beschreiben, wie Sie zu Ihrer Entscheidung gekommen sind. Verwenden Sie das Online-Formular, das unter www. spektrum.de zu finden ist, oder schreiben Sie an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Jede Person darf nur einen Entscheidungsbogen einsenden. Einsendeschluss ist der 25.11.2002. Die Gewinner werden von der Redaktion schriftlich benachrichtigt. Mitarbeiter des Verlags dürfen nicht teilnehmen. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

PROTEINSYNTHESE

Zellen schludern – zum Wohl des Organismus

Manchmal geht auch in der Zelle offenbar Masse vor Klasse. Wie sich nun zeigte, ist rund ein Drittel der frisch hergestellten Proteine mangelhaft. Doch die Zelle macht aus der Stümperei eine Tugend und nutzt den Ausschuss zur Abwehr gegen Viren.

Von Ulrich Schubert

Keine Produktion ohne Ausschuss – das gilt auch für die Biosynthese der Proteine in der Zelle. Schließlich ist sie ein höchst komplexer Vorgang. Als Erstes werden von dem Gen, das die Abfolge der Proteinbausteine (Aminosäuren) in Form eines DNA-Textes verzeichnet, Blaupausen angefertigt: so genannte Boten-RNA-Moleküle. Bei diesem Kopiervorgang – der Transkription – können bereits Fehler auftreten. Außerdem enthalten Gene höherer Lebewesen – und damit auch ihre Blaupausen – in der Regel unsinnige Passagen. Diese müssen beim so genannten Spleißen der Boten-RNA entfernt werden – eine weitere Fehlerquelle. Danach wandern die zurechtgestutzten Blaupausen zu den Proteinfabriken: den Ribosomen. Dort wird ihr RNA-Text Buchstabe für Buchstabe in ein Protein übersetzt. Auch dabei kommt es gelegentlich zu Verwechslungen. Und schließlich muss sich die frisch gebildete Aminosäurekette zu einem funktionsfähigen Eiweißstoff „falten“, was ihr nicht immer gelingt.

Angesichts dieses langen und komplizierten Produktionsprozesses ist es kein Wunder, dass etliche der frisch synthetisierten Proteine Mängel aufweisen. Allerdings überrascht der Anteil dieses Ausschusses denn doch. Wie meine Mitarbeiter und ich am Hamburger Heinrich-Pette-Institut in Zusammenarbeit mit dem Labor von Jon Yewdell und Jack Bennink am amerikanischen Nationalinstitut für Allergie und Infektionskrankheiten (NIAID) kürzlich feststellten, sind bis zu dreißig Prozent dieser neu synthetisierten Proteinprodukte mangelhaft.

Sinnlose Energieverschwendung?

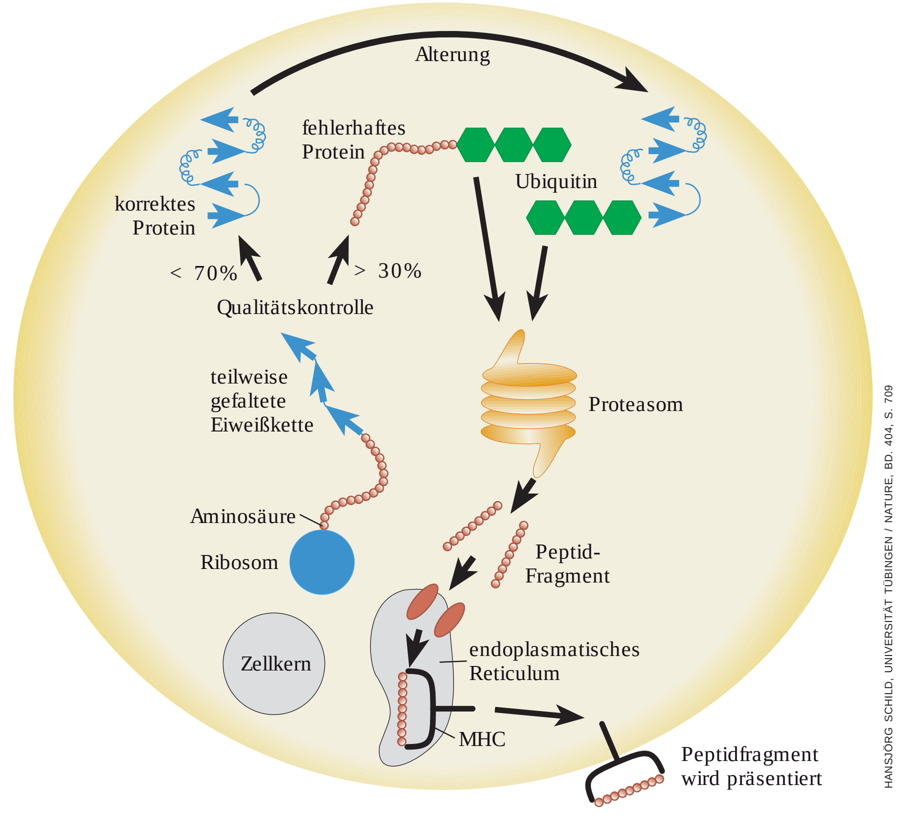
Wie kann sich die Zelle eine derart hohe Fehlerquote leisten? Zwar gewinnt sie die Aminosäure-Bausteine der defekten Proteine per Recycling zurück; dennoch geht eine Menge Energie verloren – und zwar völlig sinnlos, wie es scheint.

Doch dieser Schein trügt. Alle natürlichen Prozesse sind von der Evolution auf höchste Effizienz getrimmt. Und das gilt auch hier. Wie wir feststellten, erfüllt die Ausschussware eine nicht nur sinnvolle, sondern sogar lebenswichtige Aufgabe: Sie hilft dem Immunsystem, schneller auf Eindringlinge zu reagieren. Um das zu verstehen, müssen wir den Weg der defekten ribosomalen Produkte (DRiPs), wie die mangelhaften Produkte fachsprachlich heißen, genauer verfolgen.

Nachdem die Zelle im Rahmen einer strengen Qualitätskontrolle – von der noch nicht klar ist, wie sie funktioniert – die fehlerhaften Eiweißstoffe erkannt hat, kennzeichnet sie diese als Ausschuss. Das geschieht durch Anheften von bäumchenartigen Aggregaten des kleinen Proteins Ubiquitin. Daraufhin greift sich ein Proteasom – die Häckselmaschine der Zelle – die markierten DRiPs und zerhackt sie in kurze Ketten aus nur wenigen Aminosäuren. Diese Peptide können weiter abgebaut werden und stehen dann als neues Ausgangsmaterial für die Proteinsynthese zur Verfügung.

Ein Teil des Schredder-Mülls findet jedoch eine andere, weitaus wichtigere Verwendung. Bestimmte Moleküle namens MHC-I packen die Peptidstücke, wandern mit ihnen zur Zellmembran und präsentieren sie auf der Außenseite. Dadurch gibt jede Zelle unablässig bekannt, welche Proteine gerade in ihrem Inneren hergestellt werden.

Wurde sie nun von einem Virus befallen, zerstückeln die Proteasomen auch Proteine des Eindringlings. Und die erscheinen dann gleichfalls auf der Außen-



HANSJÖRG SCHILD, UNIVERSITÄT TÜBINGEN / NATURE, BD. 404, S. 709

Bei der Synthese eines – zelleigenen oder viralen – Proteins an den Ribosomen und der anschließenden Faltung können über dreißig Prozent Fehlprodukte entstehen. Bei einer Qualitätskontrolle erhalten sie – ebenso wie alte, defekte Proteine – ein Mängeletikett in Form von Ubiquitinketten und werden dann in der zellulären Häckselmaschine, dem Proteasom, zerhackt. Die Fragmente verbinden sich teilweise im endoplasmatischen Reticulum mit einem MHC-I-Molekül des Immunsystems, das sie schließlich an der Zelloberfläche präsentiert. Somit erkennt das Immunsystem am Ausschuss der Proteinsynthese, ob eine Zelle von einem Virus befallen ist.

membran. Dort aber werden sie von den Wachhunden des Immunsystems, den so genannten cytotoxischen *T*-Lymphocyten, erkannt. Diese veranlassen daraufhin die Zerstörung der infizierten Zelle.

Bisher war es ein Rätsel, wie Zellen es schaffen, schon kurz nach einer Infektion Bestandteile der Virusproteine an ihrer Oberfläche zu präsentieren. Zwar war der prinzipielle Mechanismus dieser Präsentation bekannt. Allerdings täuschte man sich über die Herkunft des Materials: Nach herkömmlicher Meinung sollte es sich um alte, verschlissene Proteine handeln, die ausrangiert und aus dem Verkehr gezogen worden waren. Da beim Kopieren der DNA während der Zellteilung so gut wie keine Fehler auftreten, schien es selbstverständlich, dass die Zelle bei der Proteinsynthese ebenso sorgfältig arbeitet.

Schnelligkeit ist Trumpf

Doch die Anforderungen an beide Prozesse sind offenbar ganz verschieden. Bei der Replikation vor der Zellteilung kommt es entscheidend auf Genauigkeit an, damit keine Mutationen auftreten, die in der Regel schädlich sind. Bei der Produktion der Proteine scheint dagegen Schnelligkeit Trumpf zu sein – ohne Rücksicht auf Qualität. Dabei macht die Zelle aus der Stümperei eine Tugend und nutzt den Ausschuss zum Beispiel dafür, schnellstmöglich eine Virus-Infektion nach außen zu signalisieren.

Wie konnten wir dies nachweisen? Bei unseren Experimenten fütterten wir zunächst Zellen mit einer radioaktiv markierten Aminosäure, sodass neu gebildete Proteine radioaktiv strahlten. Dann schalteten wir bei einem Teil von ihnen mit spezifischen Proteasom-Inhibitoren die Häckselmaschinen aus und verglichen nach einiger Zeit ihre Radioaktivität mit derjenigen der Kontrollzellen. Wie sich zeigte, war sie wesentlich höher. Demnach enthielten die Zellen mit ausgeschalteter Häckselmaschine viel mehr neu produzierte Proteine als die anderen.

Der Grund ließ sich leicht vermuten: Offenbar wurde in den intakten Zellen ein Teil der neuen Proteine schon während der Synthese oder zumindest direkt danach von Proteasomen zerstückelt, in den behandelten Zellen dagegen nicht. Wenn es sich bei den überschüssigen Proteinen um Ausschussware handelte, mussten sie das Fehleretikett tragen: die Bäumchen aus Ubiquitin. Zum Nachweis wurden Zellen nach Markierung mit radioaktiven Aminosäuren aufgeschlossen und mit Antikörper behandelt, die sich spezifisch an Ubiquitin heften. So konnten wir diejenigen Proteine herausfischen, die als fehlerhaft erkannt und für den Abbau markiert waren. Tatsächlich fanden wir bei lahm gelegten Proteasomen etwa 4,5-mal so viele DRiPs mit Ubiquitin-Bäumchen wie in intakten Zellen.

Als Nächstes führten wir den Nachweis, dass auch neu synthetisierte Proteine von eingedrungenen Viren in die Mühlen der Abbaumaschinerie geraten. Dazu infizierten wir Zellen mit dem Aids-Erreger HIV und fütterten sie dann mit radioaktiven Aminosäuren. Unter Verwendung von Antikörpern, die sich spezifisch an das so genannte Gag-Protein der Eiweißkapsel (des Capsids) von HIV heften, konnten wir wie erwartet zeigen, dass mit Ubiquitin markierte Gag-DRiPs sich in Zellen häuften, deren Proteasomen durch Inhibitoren abgeschaltet worden waren.

Ansatz zur Aids-Bekämpfung

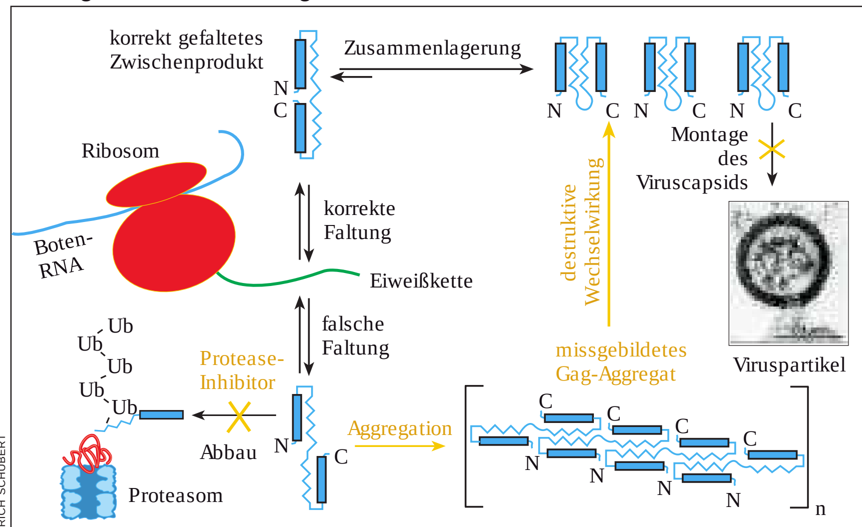
Zugleich machten wir eine weitere hochinteressante Entdeckung mit möglicherweise großer praktischer Bedeutung: Virusinfizierte Zellen, die wir mit Proteasom-Inhibitoren behandelt hatten, setzten deutlich weniger Viren frei als unbehandelte Kontrollzellen. Wie die genauere Untersuchung ergab, stört das Ausschalten der Häckselmaschine die korrekte Bildung der Gag-Proteine. Außerdem zeigte sich, dass die Viren, die freigesetzt wurden, zum Großteil unfertig und daher nicht infektiös waren.

Wie die Proteasom-Inhibitoren den Zusammenbau der Viren behindern, konnten wir noch nicht definitiv ergründen. Wir vermuten jedoch, dass die meisten der sich ansammelnden Ausschuss-Produkte trotz ihrer Mängel fähig sind, sich mit korrekten Virusproteinen zu verbinden. So entsteht aus einer Mischung von normalen und defekten Bausteinen ein fehlerhaftes Viruspartikel (Bild).

Das Schöne dabei ist, dass die Viren im Prinzip keine Möglichkeit haben, Resistenzen gegen Medikamente auf Basis von Proteasom-Inhibitoren zu entwickeln. Denn sie können die Proteasomen der Wirtszelle nur benutzen, nicht aber ihre Funktion beeinflussen. Problematisch an Proteasom-Inhibitoren ist allerdings, dass sie auch wichtige Prozesse in der Wirtszelle beeinträchtigen und damit für sie schädlich sind – was eventuell zu unerwünschten Nebenwirkungen führt.

Inzwischen konnten wir bereits den Vermehrungszyklus der Aids-Viren HIV-1, HIV-2 und des Affenimmundefizienzvirus (SIV) durch Proteasom-Inhibitoren beeinträchtigen. Hier eröffnet sich also ein aussichtsreicher neuer Weg zur Bekämpfung solcher Stämme von HIV und anderen Viren, die gegen gängige antivirale Medikamente bereits Resistenzen entwickelt haben. ■

Störung der HIV-Vermehrung



Bei einem neuen Ansatz zur Bekämpfung von Retroviren wie dem Aids-Erreger HIV wird das Proteasom blockiert. Dadurch sammeln sich in einer befallenen Zelle zum Beispiel falsch gefaltete Proteine des HIV-Oberflächenproteins Gag an. Nach einer vorläufigen Hypothese verklumpen sie zu Aggregaten, die sich mit korrekt gebildeten Gag-Proteinen verbinden, wobei defekte, nicht infektiöse Viren entstehen.

Ulrich Schubert *ist Leiter einer Arbeitsgruppe am Heinrich-Pette-Institut für Virologie in Hamburg und Gastwissenschaftler am Nationalinstitut für Allergie und Infektionskrankheiten in Bethesda (Maryland). Demnächst wird er eine Professur für Virologie an der Universität Erlangen-Nürnberg antreten.*

Himmelsscheibe von Nebra



Diese einzigartige Darstellung des Kosmos im vorgeschichtlichen Europa präsentierten Forscher des Landesamtes für Archäologie in Sachsen-Anhalt jetzt der Öffentlichkeit (www.himmelsscheibe.de). Von Grabräubern 1999 am Mittelberg bei Nebra entwendet, konnte das bedeutende kulturgeschichtliche Zeugnis Anfang dieses Jahres beschlagnahmt werden. Es entstand vor 3600 Jahren – zeitgleich mit dem Endausbau von Stonehenge. Auf einer 32 Zentimeter großen, mit Grünspan überzogenen Bronzescheibe bilden eingelegte Goldbleche einen „naturalistischen“ Nachthimmel ab. Allerdings lässt sich nur eine Siebenergruppe einem Sternbild zuordnen: den Plejaden. Ihre Stellung am Himmel markierte in der Antike den Zeitpunkt von Aussaat und Ernte. Zwei seitliche Randbögen, von denen nur noch einer vorhanden ist, gaben die Sonnenauf- und -untergangspunkte am Fundort im Jahresverlauf wieder. Mit der zuvor nur aus Ägypten bekannten Sonnenbarke erscheint erstmals ein später im bronzezeitlichen Europa weit verbreitetes mythologisches Motiv. Der Mittelberg selbst diente vermutlich als astronomische Kultstätte: Von hier aus gesehen, ging zur Sommersonnenwende die Sonne über dem Brocken und am 1. Mai über dem Hauptberg des Kyffhäusers unter.



EVOLUTION

Madagaskar und

Im trockenen Westen Madagaskars liegen Sedimente mit reichen Fossilien aus dem frühen Erdmittelalter.

MARIA STENZEL, NATIONAL GEOGRAHIC IMAGE COLLECTION



die ersten Dinosaurier

Neue Fossilien von Madagaskar zeigen: Dinosaurier entstanden viel früher als bisher angenommen. Und auch die ersten Säuger lebten vielleicht gar nicht dort, wo Paläontologen sie bislang vermuteten.

Von John J. Flynn und André R. Wyss

Dieses leopardengroße Tier, ein Traversodontier, lebte vor rund 230 Millionen Jahren. Es gehörte zu den säugetierähnlichen Reptilien und war ein besonders enger Verwandter der ersten Säugetiere. Seine kräftigen Schneidezähne und breiten Backenzähne dürfte es eingesetzt haben, um Pflanzen zu fassen und zu zermalmen.

JOHN WEINSTEIN, THE FIELD MUSEUM

Drei Wochen lang hatten wir uns schon abgeplagt. Unser Team fürchtete bereits, von dieser ersten Fossilienkampagne auf Madagaskar vor allem staubige Kleidung mit nach Hause zu bringen. Nur vereinzelte, wenig aufschlussreiche Zähne oder Knochen hatte diese Expedition bisher erbracht. Das unwegsame Gelände und vielerlei andere Schwierigkeiten, nicht zuletzt die Bürokratie, machten uns die Suche schwer.

Am Ende probierten wir unser Glück noch einmal im Südwesten dieser viertgrößten Insel der Welt. Die Begeisterung war groß, als wir im Touristenzentrum des Isalo-Nationalparks eine Stelle bezeichnet fanden, die den Namen „Ort der Tierknochen" trug. Sofort ließen wir uns dorthin fahren.

Unsere Enttäuschung war umso größer. An dem verheißungsvollen Ort gab ein Abhang tatsächlich ausgeblichene Skelettreste zuhauf frei. Doch die stammten von Hausvieh und anderen modernen Tieren. Dies mochte ein aufschlussreicher Fund für Archäologen sein, um die menschliche Besiedlung Madagaskars zu untersuchen. Wir als Paläontologen und Experten für landlebende Wirbeltiere des Erdmittelalters interessierten uns für die Evolution von Dinosauriern und frühen Säugetieren.

Als uns ein Einheimischer unbedingt zu einer zweiten Knochenstelle führen wollte, wo es angeblich von Fossilien wimmelte, gingen wir nur halbherzig mit. Umso aufgeregter war die Schar Kinder aus dem Dorf, die uns lärmend hinterherlief. Als wir schließlich skeptisch das ausgewaschene Steilufer inspizierten, stieg auch unsere Aufregung schlagartig. Denn wir entdeckten zwei daumengroße Bruchstücke eines kleinen Kiefers, die uralt wirkten. Die Knochen stammten, wie wir dann feststellten, von einem Rhynchosaurier (übersetzt „Schnabelsaurier"). Dies sind Vettern der Dinosaurier, die einen an Papageien erinnernden Schnabel trugen, allerdings Zähne besaßen (siehe Bild Seite 33). Diese erste Exkursion unternahmen wir im Jahre 1996.

Seitdem haben wir Madagaskar (amtlich Malagasy genannt) fast jedes Jahr wieder aufgesucht. Die Insel erweist sich als wahre Fundgrube von landlebenden Wirbeltieren des frühen Erdmittelalters oder wissenschaftlich Mesozoikums. In jenem Abschnitt der Erdgeschichte, der vor 250 Millionen Jahren begann und vor 65 Millionen Jahren abrupt ein Ende fand, erschienen die Dinosaurier und – was viele nicht wissen – auch die Säugetiere.

Noch ist die Bedeutung der Landmassen der Südhalbkugel für die Evolution der Dinosaurier und der Säugetiere umstritten. Seit zwanzig Jahren suchen wir darum zu ergründen, wie sich die Landwirbeltiere auf den südlichen Kontinenten entwickelten. Von Südafrika, Brasilien, Indien und der Antarktis kennen Paläontologen hierzu schon länger reiche Fossillager. Madagaskar hatten sie bisher in dieser Hinsicht vernachlässigt – zu Unrecht: Im Westen der Insel, die fast doppelt so groß ist wie Deutschland, liegen ausgedehnte Sedimente aus dem frühen Mesozoikum (siehe die Karte auf der rechten Seite). Zu dieser Zeit muss sich bei den Vorfahren der Dinosaurier und der Säugetiere Wesentliches ereignet haben.

Allerdings verteilen sich diese Gesteinsschichten in Madagaskar über ein Gebiet etwa so groß wie Kalifornien. Vor allem aber liegen sie gewöhnlich in abgelegenen Regionen, zu denen bestenfalls ausgetretene Trampelpfade oder von Ochsenkarren ausgefahrene schmale Wege führen. Mit einem Geländewagen lassen sich viele dieser Gegenden erst gar nicht erreichen. Als wir 1996 mit einem Dutzend amerikanischer und madagassischer Wissenschaftler und Studenten unsere erste Expedition starteten, mussten wir zudem die meisten Lebensmittel aus der Hauptstadt Antananarivo mitnehmen. An manchen Tagen konnten wir nicht ins Gelände fahren, weil wir keinen Treibstoff bekamen. Und immer wieder störten Buschfeuer die Arbeit. So mussten wir unsere Pläne oft von einer Stunde zur anderen umwerfen.

Hingegen half unsere Partnerschaft mit der Universität in Antananarivo, der führenden Hochschule Madagaskars, viele bürokratische Hindernisse zu überwinden. Dies betraf besonders die erforderlichen Grabungs- und Ausfuhrgenehmigungen, ohne die jede paläontologische Feldkampagne sinnlos ist.

Das schwierigste Unterfangen in einem noch fast unerforschten Gebiet aber dürfte sein, überhaupt den ersten Fundort zu entdecken. Glücklicherweise konnten wir zumindest auf geologische Karten zurückgreifen, wie sie etwa Henri Besairie gezeichnet hatte, ein Geologe, der Mitte des 20. Jahrhunderts das madagassische Bergbauministerium geleitet hatte. Die Karten verzeichnen in weiten Teilen des relativ flachen Westens der Insel eine mächtige Sedimentschicht – Kandidat für uralte Fossillagerstätten.

Erdzeitalter (Millionen Jahre vor heute)

Erdaltertum (Paläozoikum)	Erdmittelalter (Mesozoikum)			Erdneuzeit (Känozoikum)
250	205	144	65	
	Trias	Jura	Kreide	

Die dicken Ablagerungen verdanken wir einem günstigen Zusammentreffen geologischer Ereignisse. Zu Beginn des Mesozoikums, vor rund 250 Millionen Jahren, hätte man von Madagaskar aus trockenen Fußes fast alles Land dieser Welt erreichen können. Sämtliche großen Landmassen waren damals im Superkontinent Pangäa vereinigt, auch der südliche Großkontinent Gondwana. Mitten darin, aus heutiger Sicht zwischen der Westküste Indiens und der Ostküste Afrikas, lag das heutige Madagaskar (siehe die Karte unten).

Damals war es auf der Erde deutlich wärmer als heute – selbst die Pole trugen keine Eiskappen. In einer südlichen Region Gondwanas ergossen sich gewaltige Ströme in Tieflandbecken. Dort öffnete sich später zwischen Madagaskar und Afrika die heutige gut 400 Kilometer breite Meeresstraße von Mosambik.

Die ehemaligen gigantischen Tieflandbecken bilden die Ränder der geologischen Spalte, die sich auftat, als Madagaskar vor über 240 Millionen Jahren von Afrika wegzudriften begann. In solchen Grabenbrüchen oder Riftsystemen sammelten sich leicht Fossilien an: Die in sie abfließenden Wassermassen rissen neben Sand und Schlamm auch Kadaver und Skelettteile mit. Das wohl berühmteste Rift ist der ostafrikanische Grabenbruch mit seinen Zeugnissen von Vor- und Frühmenschen.

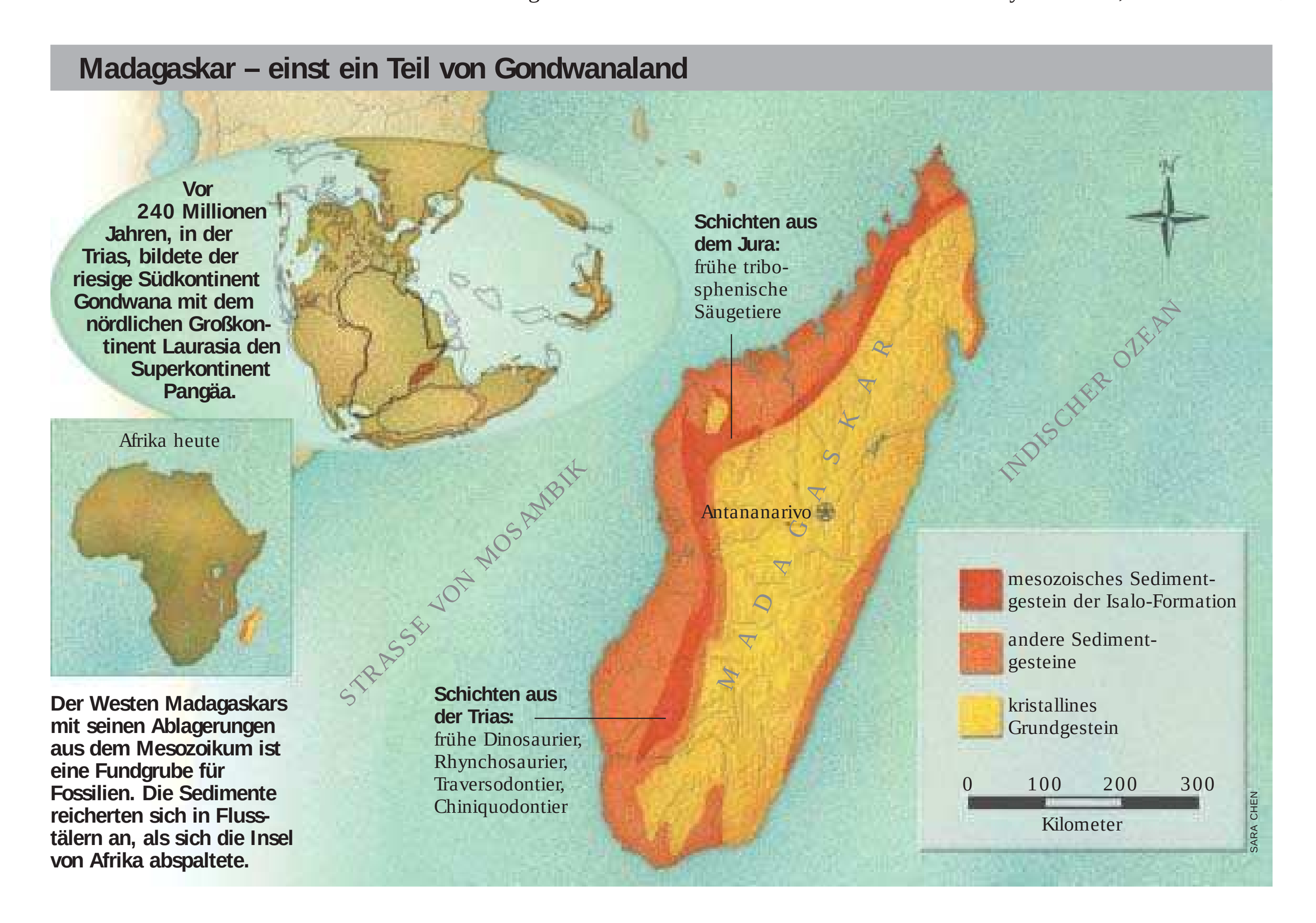
Spuren vom frühen Erdmittelalter

Je mehr der Boden des Grabens zwischen Afrika und Madagaskar gedehnt wurde und je mächtiger die Ablagerungen darauf drückten, umso tiefer sanken die Becken ab. Nach fast 100 Millionen Jahren wurden sie zum Zerreißen dünn. Nun stieg an Bruchstellen flüssiges Gestein aus dem heißen Erdinnern auf und bildete neue ozeanische Kruste.

Dass sich die Fossilien Madagaskars in den alten Sedimenten bis heute erhalten konnten, verdanken wir weiteren günstigen Umständen. Nach der Trennung von Afrika blieben die mit Sediment beladenen küstennahen Regionen weitgehend von Vulkanismus und anderen zerstörerischen Vorgängen verschont. Auch bilden die urzeitlichen Riftbecken heute die trockene Westseite der Insel, auf der nur Trockenwald, Grasfluren und Wüstenvegetation gedeihen. Wäre das Land so feucht wie der Osten Madagaskars, würde man die Fossilien unter den Pflanzen kaum finden – außerdem wären sie längst vermodert.

Nach der Trennung von Afrika blieb Madagaskar noch lange mit den Landmassen Gondwanas verbunden, die heute Indien, Australien, die Antarktis und Südamerika bilden. Von Indien löste es sich erst vor etwa 90 Millionen Jahren und wurde dann schließlich zur Insel. Seine eigenartige heutige Tierwelt mitsamt den einzigartigen Lemuren muss nach allen Erkenntnissen jüngeren Ursprungs sein. Die Herkunft dieser Tiergruppen ist immer noch ziemlich rätselhaft. Wie es aussieht, erschienen fast alle heute vertretenen größeren Wirbeltiergruppen auf der Insel irgendwann seit dem Ende des Erdmittelalters, also vor weniger als 65 Millionen Jahren (siehe Kasten Seite 34). Unsere eigene Arbeit betrifft aber eine viel frühere Zeit: die Perioden Trias und Jura, die ersten beiden Abschnitte des Mesozoikums.

Derselbe Nachmittag unserer ersten Kampagne, an dem wir die Kieferfragmente des Rhynchosauriers fanden, bescherte uns eine zweite aufregende Entdeckung. Unser Teammitglied Léon Razafimanantsoa, damals Student der Universität von Antananarivo, stöberte einen etwa handgroßen Schädel auf (Foto links). Wir konnten das Fossil gleich als das eines Cynodontiers, eines Hunds- ▶



Der Westen Madagaskars mit seinen Ablagerungen aus dem Mesozoikum ist eine Fundgrube für Fossilien. Die Sedimente reicherten sich in Flusstälern an, als sich die Insel von Afrika abspaltete.

zahnsauriers, identifizieren. Und zwar handelte es sich um einen Traversodontier (gewissermaßen einen „Querzahnsaurier“). Das waren merkwürdige Pflanzenfresser, nicht mehr ganz Reptil, aber auch noch nicht ganz Säugetier (Bild Seite 33).

Was besagten die beiden Funde von derselben Stelle? Offenbar hatten diese Tiere aus zwei völlig verschiedenen Gruppen, welche einzeln auch von anderen Orten der Erde bekannt sind, im Gebiet des heutigen Madagaskar gleichzeitig gelebt und sich in manchem vielleicht sogar ähnlich verhalten. Beide waren bodenlebende Vierbeiner und Pflanzenfresser. Die Arten dieser Gruppen maßen, so weiß man durch andere Funde, zwischen einem und drei Meter Körperlänge. Ob sie sogar beim Fressen gemeinsam umherzogen, etwa in der Weise wie heute in Ostafrika Gnus und Zebras, darüber lässt sich nur spekulieren.

Hingegen helfen Funde bekannten Alters von diesen Tiergruppen, die erdgeschichtliche Zeit einzugrenzen, in welcher die madagassischen Vertreter lebten. Rhynchosaurier fanden Paläontologen an verschiedensten Stellen der Welt. Deren Fossilien stammen immer aus der Trias – der ersten Periode des Erdmittelalters, die vor 250 Millionen Jahren begann und vor 205 Millionen Jahren endete. Traversodontier wiederum traten in der ersten Hälfte der Trias weitaus häufiger und vielfältiger auf als in der zweiten Hälfte. Darum vermuteten wir, dass unsere Funde etwas älter als ungefähr 230 Millionen Jahre sein müssten.

Auf unserer zweiten Expedition im Jahre 1997 sorgte dann ein neuer Fund vorübergehend für einige Verwirrung, was diese zeitliche Schätzung betrifft. Bald nach unserer Rückkehr nach Südwest-Madagaskar zeigte uns Mena, einer unserer einheimischen Helfer, einige sehr alte Knochen, die er in der Nähe der früheren Fundstelle am gegenüberliegenden Flussufer aufgesammelt hatte. Sie sahen aus wie Dinosaurier-Knochen. Falls das stimmte und sie aus derselben Zeit stammten wie die Fossilien vom letzten Jahr, mussten wir unsere frühere Einschätzung überdenken – so dachten wir zunächst. Denn soweit damals bekannt, lebten vor 230 Millionen Jahren noch keine Dinosaurier.

Wahres Alter der Dinosaurier

Die neuen Fossilien waren merkwürdigerweise in feinkörnigem rötlichem Stein eingebettet, während die letztjährigen Stücke in grobkörnigem weißem Sandstein gelegen hatten. Der neue Fundort, zu dem Mena uns führte, lag etwa eine halbe Meile nördlich des alten am Boden einer tiefen Rinne. Wie wir begeistert erkannten, birgt dort eine knapp einen Meter dicke Schicht roten Schlammsteins reichlich Fossilien. Diese rote Schicht hatte sich im Überschwemmungsgebiet derselben Flüsse angereichert, die den weißen Sand abgelagert hatten, stammte also aus derselben Zeit.

Unser Team grub dort etwa zwei Dutzend Fossilien aus. Sie erwiesen sich tatsächlich als Skelettteile von Dinosauriern: Wir fanden Kiefer, Abschnitte der Wirbelsäule, Hüftknochen, Klauen, sogar einen

Suche nach den ersten Säugetieren

Hindernisse bei der Feldarbeit

Von Kate Wong

Die drei Landrover halten. „Ist das GPS nun zufrieden?“, fragt jemand. John Flynn konsultiert das Gerät, das unsere Position über Satellit misst. Er beschließt, dass wir richtig fahren, und die Tour durch den Busch auf Wegen für Ochsenkarren geht weiter.

Um sieben Uhr früh sind wir in Antananarivo Richtung Nordwesten aufgebrochen. Jetzt müssen wir dringend einen Platz für die Nacht finden. Ein paar strohgedeckte Hütten tauchen auf, und Flynn sendet einige von uns hin. Sie sollen fragen, ob wir hier irgendwo kampieren dürfen.

Sieben Madagassen und sechs Amerikaner nehmen an der Expedition teil, die John Flynn und André Wyss leiten. Sie gilt Fossilien von frühen Säugetieren. In den Jahren zuvor hatten die beiden amerikanischen Paläontologen in dieser Gegend rote und gelbbraune Sedimente aus dem Jura entdeckt und darin ein Kieferfragment eines kleinen Säugetiers: *Ambondro mahabo* (siehe Bilder in diesem Kasten).



FRANK IPPOLITO

Dieses spitzmausähnliche Säugetier, nach dem Fundort eines Kieferfragments auf Madagaskar *Ambondro mahabo* genannt, war nur so lang wie eine Handspanne. Es lebte vor ungefähr 167 Millionen Jahren.

Die Säugetiere traten erst im Jura, der mittleren Periode des Erdmittelalters, auf. Und direkte Vorfahren der modernen Säugetiere – spitzmausähnliche Formen mit so genannten tribosphenischen Zähnen – kannten Zoologen bisher nur von der Nordhalbkugel und erst vom ausgehenden Jura. Doch auch das kleine Säugetier von Madagaskar besaß eindeutig solche Zähne. Allerdings lebte es 25 Millionen Jahre früher, vor etwa 167 Millionen Jahren im mittleren Jura.

Noch streiten die Experten über die Zuordnung dieses Tiers. Manche vermuten, dass es nicht zu den Vorfahren der Beuteltiere und Plazentatiere gehört, wie Flynn und Wyss annehmen, sondern in eine andere Linie, aus der die Eier legenden Säuger hervorgingen. Ihrer Ansicht nach könnte in dieselbe Linie ein anderes sehr altes Säugetier (*Ausktribosphenos nyktos)* passen, das kürzlich in Australien auftauchte und die Paläontologen ähnlich überraschte.

Das Fossilmaterial reicht bisher nicht aus, den Streit zu entscheiden. Um herauszufinden, ob die modernen Säugetiere tatsächlich zuerst im Süden erschienen, brauchen die Forscher mehr aufschlussreiche Funde von *Ambondro mahabo* oder anderen neuen Arten.

Am nächsten Vormittag brennt die Sonne schon heiß, als wir am Fuß eines Hügels Halt machen. Nur wenige Bäume wachsen in dieser ausgedorrten Landschaft. Hier haben die Forscher am Ende ihrer letzten Expedition ein viel versprechendes Fossillager entdeckt.

Flynn und Wyss machen sich auf die Suche nach weiteren fossiltragenden Stellen. Die Übrigen des Teams verteilen sich mit kleinen spitzen Werkzeugen unten am Hügel auf dem Boden. Stundenlang kriechen sie langsam weiter hoch, den Blick immer auf den Boden gerichtet, damit sie zwischen den

Unterarm mit Ellbogengelenk und mitsamt einigen Handwurzelknochen. Wir hatten Überreste von zwei Arten der Prosauropoden entdeckt, einer noch nicht offiziell benannten Gruppe früher Dinosaurier (siehe Bild Seite 33). Die eine davon scheint einer Art aus Marokko zu ähneln, die den Gattungsnamen *Azendohsaurus* erhielt. Diese Prosauropoden tauchen typischerweise in 225 bis 190 Millionen Jahre altem Gestein auf. Sie sind kleinere Vorläufer der riesigen, langhalsigen Sauropoden oder Elefantenfuß-Dinosaurier, zu denen Giganten wie der über zwanzig Meter lange und zehn Meter hohe *Brachiosaurus* gehören. Aber wie alt sind die Prosauropoden, die wir entdeckt hatten? War unsere frühere Schätzung völlig falsch gewesen? Nirgendwo sonst haben Paläontologen bisher gefunden, dass Dinosaurier gemeinsam mit Rhynchosauriern und Traversodontiern lebten. Wo immer Gesteinsschichten bereits Dinosaurier-Fossilien tragen, ob in Afrika, in Südamerika oder an noch anderen Orten: Traversodontier sind von da an rar.

Rhynchosaurier treten zwar mancherorts zusammen mit frühen Dinosauriern auf. Doch das sind offenkundig spätere Arten als *Isalorhynchus*, unser Fund von Madagaskar. Diese Form ist gut bekannt und scheint zu den um einiges früheren Vertretern der Gruppe zu gehören.

Außerdem fehlen von der madagassischen Fossilienstätte Überreste bestimmter jüngerer Reptiliengruppen, wie sie sonst zusammen mit frühen Dinosauriern anzutreffen sind. Dazu gehören die schwer gepanzerten, krokodilähnlichen Phytosaurier und die Aetosaurier, Panzerechsen mit krokodilähnlichem Körper und vogelähnlichem Kopf. Hieß dies alles, dass die madagassischen Prosauropoden mindestens so alt sind wie die ältesten bisher entdeckten Dinosaurier? Dies würde allerdings bedeuten, dass die Dinosaurier früher entstanden als bisher angenommen.

Nur von einer einzigen Fundschicht früher Dinosaurier konnten Geologen bisher das Alter direkt radiometrisch bestimmen. Die Fundstelle, deren Ablagerungen vulkanisch entstanden, liegt bei Ischigualasto in Argentinien und wurde auf rund 228 Millionen Jahre datiert. Alle anderen Fossillager mit ähnlichen Formen ordnen Paläontologen hiernach ein. Sie nehmen an, dass vergleichbare Fossilien nicht älter sein können als die argentinischen.

Weil die betreffenden madagassischen Schichten keine vulkanischen Bestandteile enthalten, können wir ihr Alter leider nicht direkt messen. Anhand der gesamten Fundsituation vermuten wir allerdings, dass die madagassischen Ablagerungen mit den Dinosaurier-Knochen noch etwas älter sind als die argentinischen. Noch früher müsste der gemeinsame Vorfahr aller Dinosaurier gelebt haben. Denn die Prosauropoden bilden bereits einen der Hauptäste im Dinosaurier-Stammbaum. Folglich müsste die Wurzel dieser im Erdmittelalter so erfolgreichen Reptilien weiter zurückliegen – doch wie weit?

Vielerorts haben Paläontologen über 245 Millionen Jahre altes Gestein unter- ▶

vielen kleinen Steinen kein Eckchen eines versteinerten Knochenfragments übersehen, das vielleicht irgendwo aus dem Boden hervorragt.

Die frühen Säugetiere waren sehr klein. Das Kieferstück von *Ambondro mahabo* misst nur 3,6 Millimeter Länge. Solche winzigen Fragmente können Paläontologen selten vor Ort deutlich erkennen. Stattdessen sammeln die Mitarbeiter erst einmal alles verdächtige Material ein.

Immerhin finden die Leute nach ein paar Stunden einen winzigen Wirbel und ein Oberschenkelfragment. Der Ort scheint für die Fossilsuche günstig zu sein. „Das ist wie Ostereiersuchen", witzelt Wyss. „Eier sind bestimmt da, nur ziemlich gut versteckt."

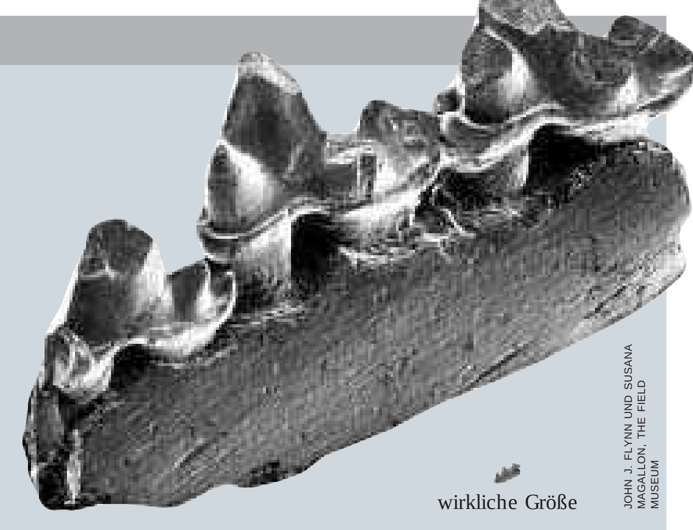
Bis zum dritten Tag hat die Gruppe mehrere verheißungsvolle Stellen aufgespürt und nahezu eine Tonne Sediment eingesackt. Jetzt geht es ans Durchspülen und Sieben des Materials in einem zur Viehtränke angestauten Bach. Trotz der sengenden Hitze müssen die Leute im Wasser wegen der Parasitengefahr Gummistiefel und Handschuhe tragen.

Die ausgesiebten gröberen Bestandteile trocknen auf einer großen Plastikfolie. Mitarbeiter in Chicago werden dieses Konzentrat später genauer unter die Lupe nehmen. Ein gutes Gefühl hat Wyss bereits jetzt: „Man sieht ja jetzt schon Knochen!" Damals bei *Ambondro mahabo* war mit bloßem Auge nichts zu erkennen.

Nach einem kargen Lunch und einer kurzen Mittagspause soll die Arbeit eigentlich weitergehen. Doch plötzlich treibt ein kräftiger Wind ein kleines Steppenfeuer auf uns zu. Wir hatten es schon am Vormittag in der Ferne gesehen. Die Bauern legen oft Feuer, weil danach frisches Gras wächst. Besonders im staubtrockenen Norden gerät ihnen die Sache allerdings manchmal außer Kontrolle.

Immer lauter wird das Knistern der Flammen auf der anderen Seite des Baches. Verkohlte Blätter rieseln herab. Gebannt beobachten wir die Kuhreiher, die sich hinter der Flammenfront an frisch gegrillten Insekten laben, und die Raubvögel über uns, die nach aufgestörten Nagetieren ausspähen. Noch zögern die Expeditionsleiter, ob sie die ausgelesenen Sedimente aufgeben sollen.

Diesmal geht alles gut. Nach einer Stunde hat sich das Feuer verzogen. Die Leute können weitersieben. Die Bachufer, vorher von trockenem Gras bewachsen, sehen jetzt nackt und verkohlt aus. Wir beeilen uns, denn der Wind kann wieder auffrischen. So können wir bald unsere Sachen zusammenpacken und uns für den Rest des Nachmittags eine andere Fossilstelle vornehmen. Solche Feuer erleben die Forscher in dieser Saison noch mehrmals. Eines hätte fast ihr Camp abgebrannt.



JOHN J. FLYNN UND SUSANA MAGALLON, THE FIELD MUSEUM

Die frühen Säugetiere waren winzig. Erst unter einer starken Lupe erkennt man die charakteristischen dreieckig wirkenden Zähne von *Ambondro mahabo*.

Kate Wong ist Online-Redakteurin bei Scientific American.

sucht, doch Dinosaurier-Fossilien fanden sie darin nie. Das engt die Suche nach den Anfängen auf eine zunehmend schmalere Zeitspanne der mittleren Trias ein, nämlich auf die relativ schlecht bekannte Phase vor ungefähr 240 und 230 Millionen Jahren.

Spektakulär sind von Madagaskar nicht nur die Dinosaurier-Funde. Auch zur Geschichte der Säugetiere sind auf der Insel Fossilien aufgetaucht, die einige offene Fragen zur Entstehung dieser großen Tierklasse klären helfen könnten. Fast zur gleichen Zeit, als auf der Erde die Dinosaurier erschienen, die im Erdmittelalter die Tierwelt dominierten, tauchten auch bereits die ersten Säugetiere auf. Nur waren sie anfangs allesamt höchstens ungefähr rattengroß, oft sogar sehr viel kleiner, und sie wirkten entsprechend wenig spektakulär. Mit Ausnahme des sehr späten Mesozoikums gibt es bisher von ihnen auch nicht besonders viele Funde. Neben den Dinosauriern führten sie ein eher unscheinbares Dasein. Madagassische Fossilien erhellen nun zwei bisher rätselhafte Abschnitte ihrer Evolutionsgeschichte. Der eine betrifft die unmittelbaren Vorfahren der Säugetiere, der andere den Ast, der zu den heutigen Säugern führt.

Erste Säugetiere und ihre Ahnen

Die Traversodontier gehören wie alle Cynodontier (Hundszahnsaurier) zu den säugetierähnlichen Reptilien, von denen die Säugetiere abstammen. Die Cynodontier stehen den Säugern besonders nah, denn zu ihnen gehören die unmittelbaren Vorfahren der Säugetiere. Die madagassischen Traversodontier-Fossilien vom Isalo-Nationalpark – die ersten, die auf der Insel gefunden wurden – sind so wertvoll, weil dazu einige der besterhaltenen frühen Cynodontier überhaupt gehören. Von einigen Exemplaren fanden wir sowohl den Schädel als auch das Skelett. Paläontologen erfahren hieraus viele neue Details über Körperbau – und zugleich Lebensweise – von Zwischenformen von den großen, kaltblütigen Kriechtieren des späten Erdaltertums zu den viel kleineren Warmblütern. Die Evolution der Säugetiere bedeutete eine beträchtliche anatomische Umgestaltung. Die Beine standen nicht mehr seitlich vom Rumpf ab, sondern befanden sich unter dem Körper: Der Watschelgang verschwand. Anstelle der Schuppen entwickelte sich ein wärmendes Fell.

Das Leben als Warmblüter erforderte eine effektivere Ernährung, also auch einen anderen Beiß- und Kauapparat. Unter anderem besaßen die Cynodontier aus Madagaskar bereits einen Unterkiefer, der im Wesentlichen nur noch aus einem Knochen bestand.

Literaturhinweise

A Triassic Fauna from Madagascar, Including Early Dinosaurs. Von John J. Flynn et al. in: Science, Bd. 286, S. 763, 22. Okt. 1999.

A Middle Jurassic Mammal from Madagascar. Von John J. Flynn et al. in: Nature, Bd. 401, S. 57, 2. Sept. 1999.

Weblinks zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis"*

Im südwestlichen Madagaskar fanden wir gleich zwei fossile Gruppen, die innerhalb der Cynodontier besonders eng mit den Säugetieren verwandt sind. Bei der einen handelt es sich um die erwähnten, von vielen Orten der Welt bekannten Traversodontier, von denen wir vier neue Arten entdeckten. Die andere Gruppe sind die viel selteneren Chiniquodontier (auch Probainognathier genannt; Bild rechts). Welchen von beiden könnten die ersten Säugetiere mehr geähnelt haben?

Die Traversodontier waren fast mit Sicherheit Pflanzenfresser. Dafür sprechen ihre breiten Backenzähne, die sich sicherlich gut zum Zermahlen von Pflanzennahrung eigneten. Eine der neuen Arten wies außerdem große, kräftige, nach vorn stehende Schneidezähne auf, mit denen sich Pflanzenteile ergreifen und abreißen ließen. Dagegen müssen die Chiniquodontier mit ihren scharfen, zugespitzten Zähnen zweifellos Fleischfresser gewesen sein.

Nach Ansicht der meisten unserer Kollegen stehen manche Chiniquodontier den Säugetieren etwas näher als die Traversodontier. Wir haben von diesen mutmaßlichen Fleischfressern auf Madagaskar sowohl Schädel als auch Skelette gefunden. Von solchen Fossilien versprechen wir uns mehr Aufschluss darüber, wie die Evolution von einem frühen Hundszahnsaurier zum ersten echten Säugetier vor sich ging.

Madagaskars Cynodontier stammen aus einem wenig erforschten Abschnitt der Trias. In Madagaskar gibt es aber auch geologische Aufschlüsse aus dem Jura, der zweiten Periode des Erdmittelalters, die vor rund 205 Millionen Jahren begann und vor rund 140 Millionen Jahren von der Kreide abgelöst wurde – der dritten und letzten Periode, an deren Ende vor rund 65 Millionen Jahren die Dinosaurier untergingen.

Im Jura lebten auf der Nordhalbkugel der Erde schon echte urzeitliche Säugetiere. Südlich des Äquators hatten Paläontologen bis dahin noch nie welche aus dieser Zeit gefunden. Trotzdem unternahmen wir schon 1996 gleich zu Anfang einen Abstecher nach Nordwest-Madagaskar, wo 165 Millionen Jahre alte Gesteine aus dem mittleren Jura freiliegen.

Wir hatten gehört, dass dort bei dem Dorf Ambondromahabo viele große Knochen von *Lapperentosaurus*, einem Sauropoden oder Elefantenfuß-Dinosaurier, zu finden seien. Nach aller Erfahrung liegen an solchen Stellen oft auch Fossilien kleinerer Tiere – nur sind die sehr viel mühsamer zu entdecken. In bewährter Manier krochen wir im Umkreis der Fundstelle über den Boden, um auch nicht das winzigste Bruchstück eines alten Knochens oder Zahns zu übersehen. Schließlich fanden wir auch ein paar nicht besonders aufregende Zähne von ganz kleinen Dinosauriern, einige Fischschuppen und ein paar winzige Knochenstücke. Die Teile hatten sich an der Oberfläche einer kleinen Erhebung aus Sediment angesammelt.

Spektakulärer Säugetierfund

Weil wir hofften, dass die Stelle mehr und wichtigere Fossilien barg, füllten wir rund hundert Kilogramm von dem Sediment in Säcke ab. Diese nahmen wir nach Antananarivo mit, wo wir auf Grabungsgenehmigungen für den Süden der Insel warten mussten. Uns blieb genügend Zeit, das Material grob zu sieben. Dazu spülten wir den Sand durch die Gaze unserer Moskito-Hüte. Den Rest, also die gröberen Bestandteile, nahmen wir später mit nach Amerika.

Die langwierige Arbeit, diesen Aufschluss teelöffelweise unter dem Binokular durchzumustern, übernahmen dankenswerterweise freie Mitarbeiter des Field Museum von Chicago. Dennis Kinzig, Ross Chisholm und Warren Valsa opferten dafür manches Wochenende. Wir selbst dachten kaum noch an die Sedimente, als 1998 eines Montags Kinzig erschien und erzählte, sie hätten ein Kieferstück eines kleinen Säugetiers entdeckt, in dem noch drei hintere Zähne saßen. Überraschte uns schon der Fund an sich, so staunten wir noch mehr über die bereits bemerkenswert hoch entwickelten Backenzähne dieses Tiers.

Es handelte sich um einen Tribospheniden – das konnten wir an den Zähnen mit den charakteristischen „tribosphenischen", im Dreieck stehenden, Haupthöckern eindeutig erkennen. Von diesem Typ stammen, abgesehen vom Eier legenden Schnabeltier und Ameisenigel, wahrscheinlich alle übrigen heutigen Säugetiere ab.

Sensationell an dem Fund war sein Alter. Dieses Fossil war mehr als 25 Mil- ▶



MARIA STENZEL, NATIONAL GEOGRAHIC IMAGE COLLECTION

Diese vier Wirbeltierformen teilten sich zur Überraschung der Paläontologen im frühen Erdmittelalter den Lebensraum. Die langhalsigen Pflanzen fressenden Prosauropoden gehören zu den bisher ältesten Dinosauriern. Die häufigsten Pflanzenfresser in dieser Gemeinschaft dürften allerdings Rhynchosaurier gewesen sein. Die beiden anderen Formen sind Angehörige der Cynodontier, säugetierähnlichen Reptilien.

Bruch in der Geschichte

Rätsel der heutigen Tierwelt von Madagaskar

Madagaskar ist die Heimat der Lemuren. Vierzig verschiedene Arten dieser eigenartigen Primaten leben dort. Auch sonst sind achtzig Prozent der Tiere und Pflanzen der Insel rein einheimisch. Dies spiegelt ihre lange geografische Isolation wider: Seit fast 90 Millionen Jahren ist Madagaskar von größeren Landmassen getrennt. Von Afrika löste es sich vor etwa 160 Millionen Jahren.

Die Vorfahren der heutigen Säugetierwelt Madagaskars lebten noch nicht auf der Insel. Ein Team um David W. Krause von der Staatsuniversität von New York in Stony Brook grub im Nordwesten zahlreiche etwa 70 Millionen Jahre alte Fossilien aus. Die Wissenschaftler entdeckten dort über drei Dutzend verschiedene Arten von Landwirbeltieren. Keine einzige davon ist mit irgendwelchen heutigen Bewohnern näher verwandt.

Die Vorfahren der modernen Arten dürften die Insel demnach erst später erreicht haben. Am wahrscheinlichsten kamen sie aus Afrika, so verschieden dessen jetzige Tierwelt von der Madagaskars ist. Von den vielen afrikanischen Säugetiergruppen haben wohl nur vier die Insel besiedelt. Die madagassischen Nagetiere, Lemuren, Raubtiere und die igelartigen Tenreks scheinen von alten afrikanischen Arten abzustammen. Doch viele heute für Afrika typische Gruppen – darunter Elefanten, Katzen, Antilopen, Zebras und Affen – gelangten offenbar nie auf die Insel.

Wie die anderen Tiere über das Meer gelangten, ist unklar. Manche sind vielleicht entlang einer Inselkette geschwommen, als der Meeresspiegel gerade tiefer lag. Kleinere Arten könnten auf natürlichen Flößen verdriftet sein.



Zurzeit vergleichen wir zusammen mit Anne D. Yoder von der Northwestern Universitiy und anderen Forschern Erbgut-Sequenzen von heutigen madagassischen Säugetieren. Wir möchten aufklären, ob deren Vorfahren in einem Schub – etwa über eine Inselkette – ankamen oder ob mehrere Einwanderungswellen stattfanden.

lionen Jahre älter als die frühesten bisher gefundenen Tribospheniden. Nach dem Fundort nannten wir die neue Art *Ambondro mahabo.*

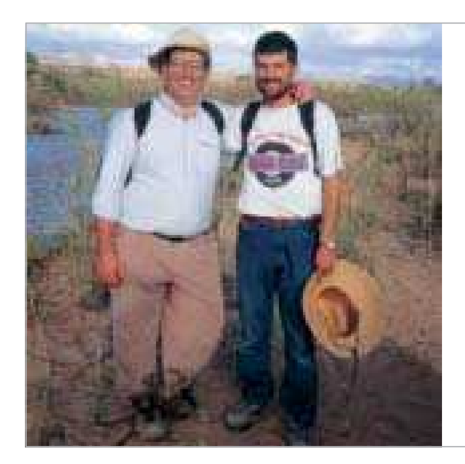
Erstmals erhaschen wir einen Blick auf die Evolution der frühen Säugetiere auf einem südlichen Kontinent. Dass die neue Art in der zweiten Hälfte des Juras lebte, könnte bedeuten, dieser wichtige Säugetierast entstand auf der Südhalbkugel und nicht, wie bisher angenommen, im Norden. Es ist noch zu früh, diese Frage zu entscheiden (siehe Kasten Seite 30/31). Dazu benötigen wir vor allem noch mehr Funde. Dieser eine zeigt zumindest: Wir dürfen auch die bisherige Auffassung nicht einfach übernehmen. Dass bis heute alle Fossilien dieser Tiergruppe von der Nordhalbkugel stammten, ist historisch erklärbar.

Bisher haben Paläontologen die südliche Tierwelt der Landwirbeltiere im Erdmittelalter viel weniger erforscht als die der Nordkontinente. Die bekannte Artenzahl von Australien, Afrika, Südamerika und der Antarktis dürfte noch um eine Größenordnung kleiner sein als die der nördlichen Hemisphäre. Madagaskar zählt heute zu den aussichtsreichsten Gebieten, um zu erforschen, welche Tiere Gondwana durchstreiften.

Unsere Expeditionen zeigen, wie wichtig neue Fossilfunde oft für bedeutende neue Hypothesen zur Evolution der Lebewesen sind. Die madagassischen Fossilien erlauben gleich zwei neue Thesen: Erstens könnten die Dinosaurier früher entstanden sein als bisher angenommen; zweitens stammen die tribosphenischen Säugetiere, die Stammeltern praktisch aller heutigen Gruppen, möglicherweise von der südlichen Hemisphäre. Ob das zutrifft oder nicht, können am besten weitere Funde klären.

Deswegen möchten wir auf Madagaskar auch in Zukunft nach Fossilien suchen. Wir wollen dabei nicht nur an den schon entdeckten Fundplätze graben, sondern uns auch nach neuen Stellen umsehen. Auf äußerliche Hindernisse müssen wir dabei jederzeit gefasst sein, und wenn das Straßensperrungen sind. Während unserer ersten drei Expeditionen verschwendeten wir keine Gedanken an die vielen Kiesel, die im Südwesten der Insel auf dem Triasgestein liegen. Wir ahnten nicht, dass diese Kiesel Saphire enthalten. Als wir 1999 ankamen, wimmelte die Landschaft von Edelsteinsuchern. Schon im Jahr darauf gehörten unsere sämtlichen triassischen Fundstätten zu Claims. Niemand darf diese Gebiete mehr unerlaubt betreten. Paläontologen brauchen besondere Genehmigungen der Regierung und des Besitzers.

Auch ohne solche Schwierigkeiten könnte man die auf der Insel freiliegenden alten Gesteine selbst in Generationen nicht erschließen. Dennoch hoffen wir, auf Madagaskar noch manchen paläontologischen Schatz zu finden. ■



John J. Flynn *(links) und* **André R. Wyss** *erforschen seit nahezu zwanzig Jahren die Geschichte von Landwirbeltieren und unternahmen gemeinsam viele Feldexkursionen. Flynn ist MacArthur-Kurator für fossile Säugetiere am Field Museum in Chicago: Er lehrt auch an Universitäten Chicagos. Wyss ist Professor für Geowissenschaften an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und Wissenschaftler am Field Museum.* *Die Autoren danken der National Geographic Society, der Familie von John C. Meeker und dem WWF für ihre besondere Unterstützung.*

INTERGALAKTISCHES MEDIUM

Die Macht der kosmischen Leere

Selbst die endlosen Weiten zwischen den Galaxien sind nicht völlig frei von Materie. Sie bilden den Schauplatz für die Entwicklung großräumiger Strukturen im Universum.

Von Evan Scannapieco, Patrick Petitjean und Tom Broadhurst

Könnten Astronauten zu einem Flug von der Erde bis in den Weltraum außerhalb unseres Milchstraßensystems aufbrechen, so wäre das eine Reise in die leerste Ödnis, die man sich vorstellen kann. Nach Verlassen des heimischen Sonnensystems fänden sie sich im interstellaren Raum wieder. Selbst die nächsten Sterne sind so weit entfernt, dass Licht mehrere Jahre braucht, um diese Distanzen zu überbrücken. Jene unvorstellbare Weite ist zwar noch mit Gas „erfüllt“; im Mittel befindet sich aber nur ein Atom in einem Volumen von einem Kubikzentimeter.

Freilich würde die Reise in noch viel einsamere Gefilde führen. In den Außenbezirken der Milchstraße trennen bereits dutzende, dann hunderte Lichtjahre die einzelnen Sterne. Die Dichte des interstellaren Gases sinkt noch einmal um zwei Größenordnungen. Und schließlich, in der endlosen Schwärze außerhalb der Milchstraße, ist das Gas so verdünnt, dass es kaum noch diesen Namen verdient: Hier stehen einem Atom hunderttausend Kubikzentimeter zur Verfügung; in einem Kubikmeter tummeln sich also nur zehn Atome.

Der Wechsel der Dichte vom interplanetaren zum intergalaktischen Raum ist krasser als beim Übergang von Wasser zu Luft. Was läge da näher als die Vermutung, dass die tiefsten Tiefen des Weltalls ganz besonders langweilig seien? Die Astronomen haben sich denn auch lange kaum für den Raum zwischen den Galaxien interessiert: Warum sich mit ein paar verstreuten Atomen befassen, wo es doch geheimnisvolle Planeten, formenreiche Galaxien und gigantische Schwarze Löcher in Hülle und Fülle zu untersuchen gibt!

Doch diese Einstellung hat sich gründlich gewandelt. Das intergalaktische Medium hat sich geradezu als zentrale Bühne der kosmischen Entwicklung entpuppt. Es ist älter als jede Galaxie. Am Anfang des Universums gab es überhaupt nur heißes ▶

MARK A. GARLICK



Wie Tautropfen auf einem Spinnennetz sammeln sich Galaxien entlang faden- oder faserartiger Materiestrukturen, die sich durch die endlose Weite des Weltalls ziehen. Der Materieaustausch zwischen Galaxien und intergalaktischem Medium hat neuen Erkenntnissen zufolge die Entwicklung des Universums maßgeblich bestimmt. Diese künstlerische Darstellung basiert auf Computersimulationen des intergalaktischen Gases.

IN KÜRZE: Das intergalaktische Medium

➤ Nach irdischem Maßstab ist der Weltraum in Erdnähe, wo sich Astronauten aufhalten, praktisch ein Vakuum. Doch der Raum zwischen den Galaxien ist mit nur einem Millionstel der Dichte noch viel „leerer“. Früher bezweifelten die Astronomen, dass in einem derart verdünnten Gas überhaupt etwas Interessantes passieren könnte.

➤ Immer mehr Beobachtungen weisen darauf hin, dass das intergalaktische Medium mindestens drei dramatische Übergänge erlebt hat – mit tief greifenden Auswirkungen auf die Bildung von Galaxien und anderen kosmischen Strukturen.

Gas, das den gesamten Weltraum erfüllte. Durch die Expansion des Universums hat es sich abgekühlt und ist zu den unzähligen Galaxien kondensiert, die man am Nachthimmel sieht. Was dazwischen zurückblieb, ist heute diffuser denn je.

So viel wussten die Astronomen auch schon vor Jahrzehnten – und dachten, dass die Details des intergalaktischen Gases keine Rolle spielten und allein die Schwerkraft maßgebend für die Entstehung der Galaxien sei. Sie nahmen an, dass das intergalaktische Medium der Schwerkraft nichts mehr entgegensetzte, seit es aus seinem heißen ionisierten Urzustand zu einem kühleren Gemisch aus neutralem Wasserstoff und Helium übergegangen war. Bereiche mit höherer Dichte zogen Materie aus der Umgebung heran: ein Vorgang, der noch heute ungestört abläuft. Demnach sollten Dichte, Lage und Ausdehnung von Galaxien und größeren Strukturen ausschließlich von der ursprünglichen, zufälligen Massenverteilung abhängen. Selbst wenn das intergalaktische Medium eine innere Struktur aufweisen sollte (was die meisten Astronomen für unwahrscheinlich hielten), dann würde es die wirklich interessanten Teile des Universums auf keine Weise beeinflussen.

Je mehr die Astronomen jedoch über die Eigenschaften des Gases lernten, desto größer wurden die Widersprüche zu dieser simplen Theorie. Sie entdeckten, dass das intergalaktische Medium eine komplizierte Geschichte hat. So durchlief es mehrere wichtige Übergänge, die eng mit der kosmischen Strukturbildung verwoben waren. Und sie fanden heraus, dass dieses Gas ein gigantisches Netzwerk aus Flächen und Filamenten bildet, das zwischen den Galaxien wie ein Spinnennetz aufgespannt ist.

Diese Befunde spornten die Wissenschaftler an, und in den vergangenen zwei Jahren ist die Anzahl der Forschungsprojekte geradezu explosionsartig gestiegen. Aber wie etwas untersuchen, das man praktisch nicht sieht? Wie Detektive müssen die Astronomen Indizien sammeln und zu einem Bild zusammenfügen, um die Geschichte des intergalaktischen Gases zu erhellen.

Die einzelnen Puzzlestücke stammen aus vier verschiedenen Quellen. Es sind dies (siehe auch die Grafik auf Seite 41):

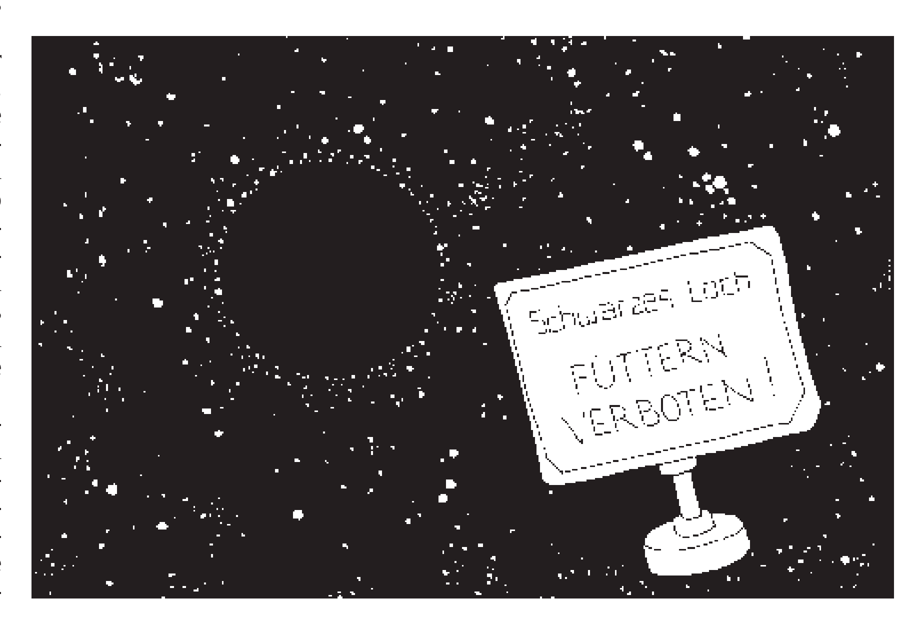
➤ die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung,
➤ die Spektren von Quasaren,
➤ die Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen und
➤ Messungen von Magnetfeldern.

Der Mikrowellenhintergrund liefert eine Momentaufnahme des intergalaktischen Mediums zu einem Zeitpunkt, als dessen Temperatur auf wenige tausend Kelvin gefallen war und sich die Atomkerne mit Elektronen zu neutralen Atomen zusammenlagerten. Dies geschah etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall. Winzige Inhomogenitäten in der Hintergrundstrahlung sind die Grundlage aller Modelle des intergalaktischen Mediums.

Die zweite Quelle sind die Quasare, extrem helle Objekte (vermutlich von jungen, extrem massereichen Schwarzen Löchern angetrieben), die wie Leuchtfeuer den intergalaktischen Raum durchstrahlen. Materie auf der Sichtlinie zwischen uns und einem Quasar absorbiert Licht bestimmter Wellenlängen, was im Spektrum des Quasars ein charakteristisches Muster hinterlässt. Die Deutung der Spektren ist jedoch nicht einfach: Die Linien scheinen keiner bekannten chemischen Substanz zu entsprechen. Der Grund ist die Expansion des Universums, die Lichtwellen in die Länge zieht. Damit verschieben sich auch die Spektrallinien zum roten Ende des sichtbaren Spektralbereichs hin. Je weiter ein Objekt von uns entfernt ist, desto stärker hat sich das Universum seit Emission des Lichtstrahls ausgedehnt und desto stärker ist die Rotverschiebung.

Die ersten Quasarspektren haben die Astronomen Mitte der 1960er Jahre beobachtet, aber erst Ende der 1970er Jahre waren die Detektoren empfindlich genug für wirklich gute Spektren. Alec Boksenberg, damals am University College London, und Wallace L. W. Sargent vom California Institute of Technology in Pasadena fiel auf, dass jedes Spektrum hunderte Absorptionslinien enthielt. Auf dem Papier sah das wie ein Dickicht aus Linien aus, was bald zu dem Namen „Lyman-Alpha-Wald“ führte. Die Bezeichnung Lyman-Alpha besagt, dass neutrales Wasserstoffgas die Absorption verursacht. Und die Fülle der Linien zeigt, dass der Raum zwischen uns und dem Quasar von Hunderten von Gaswolken erfüllt ist – jede in einem anderen Abstand und deshalb mit anderer Rotverschiebung (siehe Kasten rechts).

Obwohl neutraler Wasserstoff die Linien bestens erklären kann, macht er doch nur einen kleinen Bruchteil der Wolken aus: Ionisierter Wasserstoff und Helium müssen bei weitem dominieren.

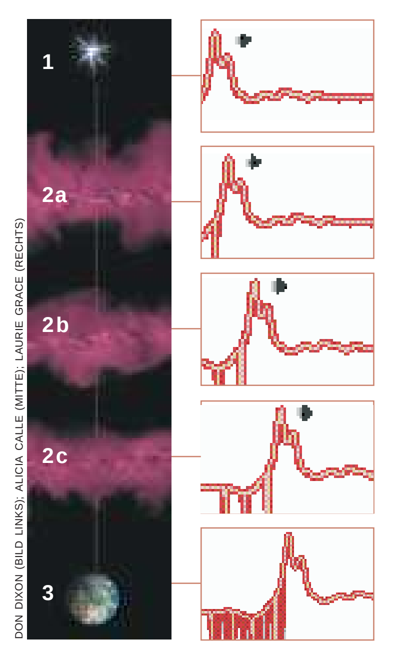


Ein „Wald“ aus Absorptionslinien

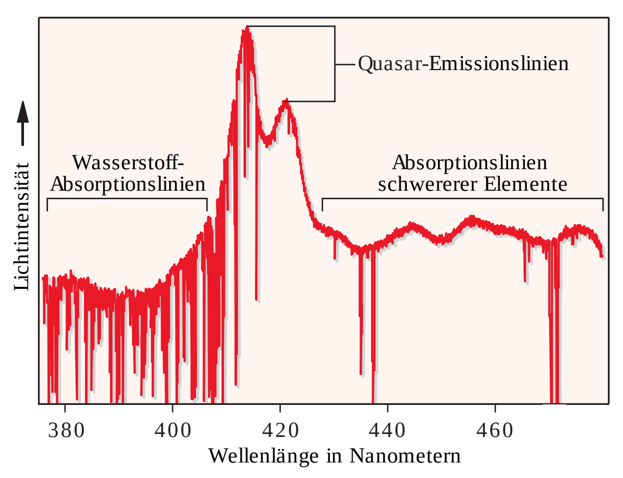
Das intergalaktische Gas mag zwar äußerst dünn verteilt sein; doch macht es sich bemerkbar, indem es das Licht ferner Strahlungsquellen beeinflusst. Vor allem in den Spektren von Quasaren, den hellsten Objekten im bekannten Universum, hinterlässt es seine Spuren. Wie eine farbige Sonnenbrille halten die Gaswolken Licht bestimmter Wellenlängen zurück und lassen den Rest durch. Das Ergebnis ist eine Serie von Absorptionslinien in den Quasarspektren. Ein typisches Spektrum weist so viele dieser Linien auf, dass sich für sie der Begriff „Lyman-Alpha-Wald“ eingebürgert hat.

1. Das Licht beginnt seine Reise mit ziemlich glattem Spektrum (rote Kurve). Sein Intensitätsmaximum liegt bei 122 Nanometern, der Lyman-Alpha-Linie des Wasserstoffs.

2. Auf dem langen Weg zur Erde geschieht zweierlei: Die Expansion des Universums verschiebt das Licht zu größeren Wellenlängen, und jede Wasserstoffwolke im Weg hinterlässt eine tiefe Absorptionsdelle im Spektrum bei einer Wellenlänge von 122 Nanometern. Weil jede dieser Dellen auf dem weiteren Lichtweg ebenfalls ins Rote verschoben wird, entsteht eine Abfolge von Absorptionslinien.



3. Wenn das Licht schließlich die Erde erreicht, ist das Spektrum voller Lücken, hinterlassen von hunderten Absorptionslinien von Wasserstoff und gelegentlich auch von schwereren Elementen. In dem unten abgebildeten Spektrum des Quasars HE 1122–1628 ist das ursprünglich bei 122 Nanometern ausgesandte Emissionsmaximum nach 414 Nanometer verschoben worden.



Denn neutrales Gas absorbiert Strahlung nicht nur einer ganz bestimmten Wellenlänge, sondern in einem schmalen Bereich um diese Wellenlänge herum, denn die zufällige Wärmebewegung der Atome verbreitert die idealen Absorptionslinien. 1965 zeigten James E. Gunn und Bruce A. Peterson, beide damals am California Institute of Technology, dass wegen dieser thermischen Verbreiterung die Absorptionslinien verschiedener Wolken überlappen würden, wenn nur eines von einer Million Atomen des intergalaktischen Mediums neutral wäre. Anstelle eines „Waldes“ aus einzelnen Linien würden die Astronomen dann einen kontinuierlichen Absorptions-„Trog“ sehen.

Der Umstand, dass man den Lyman-Alpha-Wald überhaupt sieht, beweist also bereits, dass das kühle und überwiegend neutrale intergalaktische Medium, das für eine allein von der Schwerkraft getriebene Galaxienbildung erforderlich wäre, recht kurzlebig war. Etwas muss das Gas wieder ionisiert haben, bevor sich die meisten Quasare bildeten.

Hierzu gelang kürzlich eine interessante Entdeckung mit dem Sloan Digital Sky Survey – der detailliertesten Himmelsdurchmusterung, die bisher durchgeführt wurde. Robert H. Becker von der Universität von Kalifornien in Davis und seine Mitautoren untersuchten einen der fernsten und ältesten Quasare, die man kennt. Das Spektrum dieses Objekts mit der Katalognummer SDSSpJ103027.10+052455.0 enthält eine besonders breite Lyman-Alpha-Absorption – vielleicht die erste Beobachtung eines Absorptionstrogs, wie von Gunn und Peterson vorausgesagt. Dies könnte ein rarer Blick in eine Epoche sein, in der die Reionisation noch andauerte.

Nicht nur über die Dichte und Ionisation des intergalaktischen Mediums geben die Quasarspektren Auskunft: Sie zeigen auch, wie die Materie im Weltraum verteilt ist. Jedes Spektrum mit Absorptionswald ist gewissermaßen ein Bohrkern quer durch den Kosmos. Durch den Vergleich vieler solcher Bohrkerne miteinander und mit Computersimulationen der Strukturbildung lässt sich die räumliche Anordnung der Materie im All rekonstruieren. Auch der Gravitationslinseneffekt, der das Licht eines Quasars durch die Schwerkraft einer Galaxie nahe der Sichtlinie ablenkt, hilft dabei. Der Linseneffekt liefert nämlich zwei Bohrkerne so dicht nebeneinander, wie sie zufällig wohl nie zu Stande kämen. Auf diese Weise konnten Michael Rauch von den Carnegie-Observatorien in Pasadena sowie Sargent und Thomas A. Barlow vom California Institute of Technology Gasbewegungen im intergalaktischen Medium messen. Der Großteil des Mediums erwies sich zwar als ruhig, aber die dichtesten Bereiche wurden von energiereichen Prozessen aufgewühlt, wie sie sich offenbar ungefähr alle 100 Millionen Jahre ereignen.

In den letzten sieben Jahren konnten die Astronomen auch Spuren schwererer Elemente anhand ihrer Absorptionslinien nachweisen. Zuerst wurde ionisierter Kohlenstoff entdeckt, leicht zu erkennen anhand eines Liniendubletts in der Nähe von ▶

Die Spektren der Quasare sind wie Bohrkerne. Sie liefern uns Informationen aus den Tiefen des Universums

Lyman-Alpha. Magnesium und Sauerstoff folgten. In Galaxien bilden sich aus diesen Elementen gern große Moleküle – Staubteilchen, die durchfallendes Licht röten. In den Lyman-Alpha-Wolken tritt solche Rötung nicht auf: Die schweren Elemente dort bleiben also einzelne Atome, wobei eines von ihnen auf eine Million Wasserstoffatome kommt. Das ist nicht gerade viel, und doch beweist es, dass das intergalaktische Medium mehr sein muss als ein bloßer Überrest der Galaxienbildung: Elemente, die in Sternen entstanden, sind irgendwie aus den Galaxien in den intergalaktischen Raum verfrachtet worden.

Jede Generation kosmischer Objekte verändert das Gas zwischen den Galaxien – und umgekehrt

Die Quasarspektren liefern Informationen über kleine Wolken geringer Dichte in meist enormer Entfernung von der Milchstraße – aus einer frühen Epoche des Universums also. Die dritte Beobachtungstechnik hingegen erforscht dichte, massereiche Gaspakete in relativer Nähe. Dieses Gas befindet sich in den größten gravitativ gebundenen Strukturen, den Galaxienhaufen. Dieser Begriff führt eigentlich in die Irre, denn Galaxienhaufen bestehen im Wesentlichen aus heißem Plasma, in dem die Sternsysteme sitzen wie die Samen in einer Wassermelone. Das ionisierte Gas – eine komprimierte Form des intergalaktischen Mediums – ist auf mehrere Millionen Grad aufgeheizt worden und strahlt hell im Röntgenbereich. Dank der Röntgensatelliten Chandra und XMM-Newton können wir dieses Gas heute genau untersuchen.

Im konventionellen Bild der Strukturbildung ist das Haufengas allein durch den Gravitationskollaps so heiß geworden. Wenn dem so ist, dann müsste die Temperatur mit der Masse und Dichte – und damit der Leuchtkraft – zusammenhängen: Die Leuchtkraft sollte proportional zum Quadrat der Temperatur sein. In Wirklichkeit ist sie aber proportional zu deren 3,5-ter Potenz. Wieder sieht es so aus, als sei das intergalaktische Medium der Schauplatz unverhoffter Aktivität gewesen.

Der vierte und letzte empirische Befund betrifft eine der unsichersten und zugleich potenziell entscheidenden Eigenschaften des intergalaktischen Mediums: seine magnetische Struktur. Wenn sich Elektronen durch ein Magnetfeld bewegen, senden sie Radiostrahlung aus, die in derselben Richtung polarisiert ist wie das Magnetfeld. Wegen der geringen Dichte des intergalaktischen Gases ist die Emission leider extrem schwach. Im Jahr 1989 entdeckten Kwang-Tae Kim und Philipp P. Kronberg, damals beide an der Universität Toronto, eine diffuse Brücke magnetisierten Materials, die zwei Galaxienhaufen verbindet. Doch derartige Messungen in den Tiefen des Raumes sind nicht möglich. Die Astronomen müssen sich im Wesentlichen auf Hinweise stützen, die sie in großen Galaxien und Galaxienhaufen finden. In den meisten Spiralsystemen sind die Magnetfelder nämlich so stark, dass sie die Bildung und Rotation der Galaxien beeinflussen. Deren geordnete Struktur deutet auf ein „Saatfeld“ hin, das älter als die Galaxien ist und stärker wurde, als sie Gestalt annahmen. Auf größeren Skalen haben Untersuchungen im Radiowellenbereich diffuses magnetisiertes Gas in mehreren nahen Galaxienhaufen nachgewiesen. Das intergalaktische Medium als Ganzes scheint also magnetisiert zu sein.

So unvollständig diese vier Arten von Hinweisen auch sind: Sie zeigen, dass das intergalaktische Gas im Laufe der kosmischen Entwicklung mindestens drei dramatische Veränderungen erlebt hat. Die erste ist gut verstanden: Der Übergang von ionisierten zu neutralen Atomen sorgte dafür, dass die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung entstehen konnte.

Der zweite Übergang, von neutral zurück in den ionisierten Zustand, ist schon mysteriöser. Diese Reionisation könnte durch Quasare ausgelöst worden sein, durch Sterne in frühen Galaxien oder gar durch eine hypothetische Population von Riesensternen überall im Raum (siehe „Die ersten Sterne im Universum“, Spektrum der Wissenschaft 02/2002, S. 26). Dieses Ereignis hatte zwar wenig Einfluss auf die Bildung der großen Galaxien, aber es könnte genügend thermischen Druck erzeugt haben, um das Entstehen kleinerer Galaxien zu behindern – das einfache Bild von der rein gravitativen Strukturbildung wird komplizierter.

Die Astronomen haben zwar alle in Frage kommenden Ionisierungsmechanismen näher untersucht, sie konnten aber die Ursache noch nicht eindeutig bestimmen. Die besten Beobachtungen des stellaren Beitrags stammen von den so genannten Lyman-break-Galaxien: Deren Spektren zeigen eine scharfe Abschneidekante, die dadurch hervorgerufen wird, dass neutraler Wasserstoff innerhalb der Sternsysteme das Licht der Sterne absorbiert. Bei Galaxien in genügend großem Abstand ist dieser Einschnitt von seiner normalen Lage im ultravioletten Teil des Spektrums in den sichtbaren verschoben. Indem Astronomen nun nach einem solchen Break im sichtbaren Licht suchen, können sie ferne Galaxien identifizieren, ohne in mühsamer Arbeit die Rotverschiebung Linie für Linie zu vermessen. Mit diesem Verfahren, das eine Autorengruppe um Charles C. Steidel vom California Institute of Technology entwickelt hat, konnten große Kataloge ferner Galaxien erstellt werden – also jener Sternsysteme, deren Licht bei der Reionisation des intergalaktischen Mediums geholfen haben könnte. Das Verfahren unterliegt jedoch einem Auswahleffekt: Sie greift vor allem die hellsten Galaxien heraus und erfasst nicht den kompletten Beitrag der Sterne zur Reionisation.

Eine andere Methode basiert auf der Häufigkeit und Verteilung der schweren Elemente. Wenn diese Elemente überall beobachtet werden, dann waren die ersten Objekte wohl massereiche, gleichmäßig im Raum verteilte Sterne. Quasare oder Zwerggalaxien würden die Elemente nämlich ungleichmäßiger verstreut haben. Bisherige Messungen vermochten leider noch nicht zwischen den Szenarien zu unterscheiden.

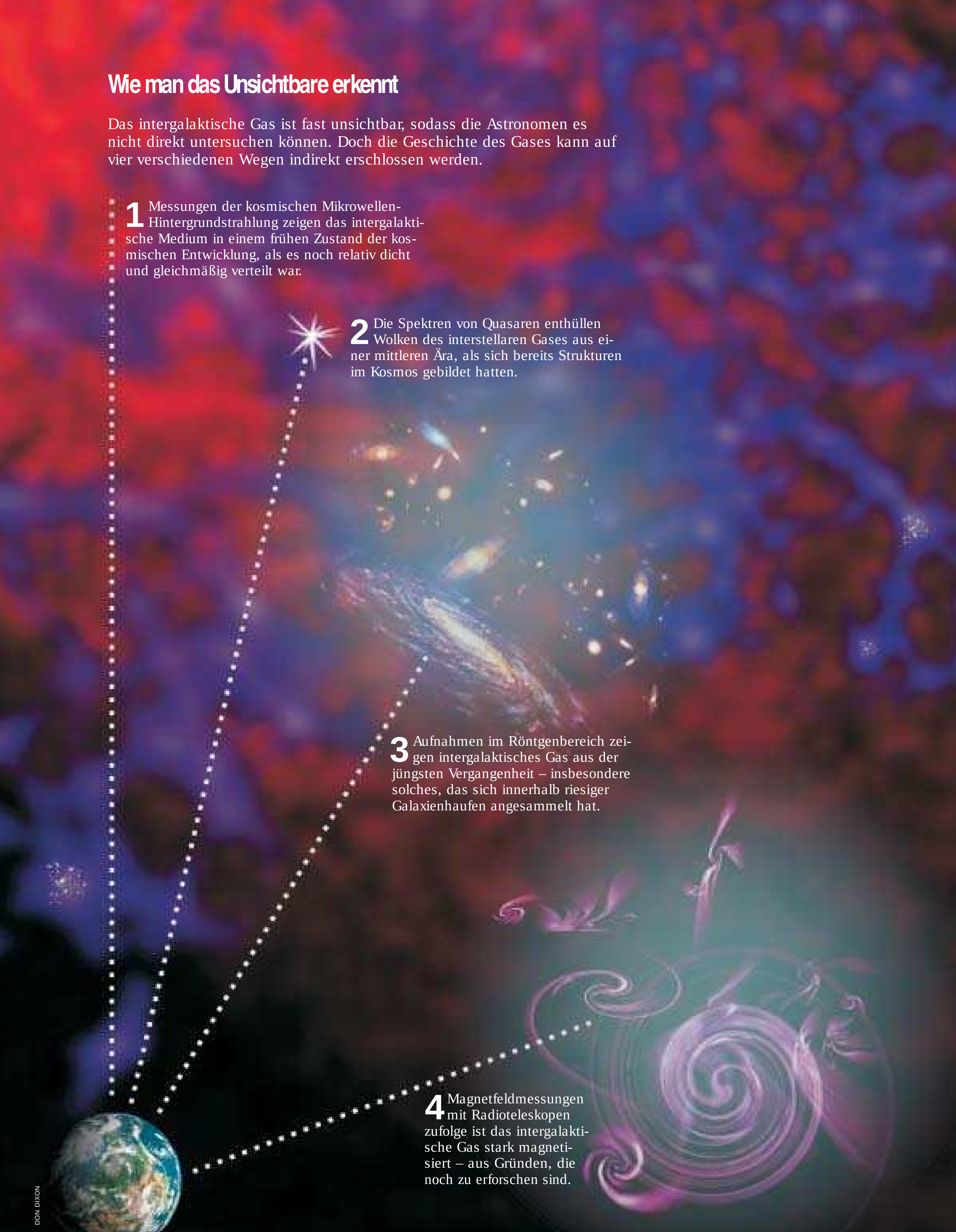
Die dritte Transformation des intergalaktischen Mediums ist die geheimnisvollste: Sie hat für den beobachteten Zusammenhang zwischen Leuchtkraft und Temperatur in den Galaxienhaufen gesorgt. Die überzeugendste Erklärung legte Nicholas Kaiser, damals Toronto, 1991 vor. Er mutmaßte, dass das Haufengas bereits auf mehrere Millionen Grad vorgeheizt war, bevor der Schwerkraftkollaps begann. Diese Vorheizung hätte die Dichte des Haufengases reduziert – ein Effekt, der sich auf die kleinen Haufen, in denen die Schwerkraft geringer ist, am stärksten ▶

Literaturhinweise

The Role of Heating and Enrichment in Galaxy Formation. Von Evan Scannapieco und Tom Broadhurst in: Astrophysical Journal, Bd. 549, Heft 1, S. 28 (März 2001).

The Lyman-Alpha Forest at Low-Redshift: Tracing the Dark Matter Filaments. Von Patrick Petitjean, Jan P. Mücket und Ronald E. Kates in: Astronomy & Astrophysics, Bd. 295, Heft 1, S. L9 (März 1995).

Weblinks zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“*



Wie man das Unsichtbare erkennt
Das intergalaktische Gas ist fast unsichtbar, sodass die Astronomen es nicht direkt untersuchen können. Doch die Geschichte des Gases kann auf vier verschiedenen Wegen indirekt erschlossen werden.
1 Messungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zeigen das intergalaktische Medium in einem frühen Zustand der kosmischen Entwicklung, als es noch relativ dicht und gleichmäßig verteilt war.
2 Die Spektren von Quasaren enthüllen Wolken des interstellaren Gases aus einer mittleren Ära, als sich bereits Strukturen im Kosmos gebildet hatten.
3 Aufnahmen im Röntgenbereich zeigen intergalaktisches Gas aus der jüngsten Vergangenheit – insbesondere solches, das sich innerhalb riesiger Galaxienhaufen angesammelt hat.
4 Magnetfeldmessungen mit Radioteleskopen zufolge ist das intergalaktische Gas stark magnetisiert – aus Gründen, die noch zu erforschen sind.
DON DIXON

auswirken musste. Die Verringerung der Dichte hätte zu geringeren Leuchtkräften geführt, was wiederum die Abhängigkeit von der Temperatur verstärkt hätte, die mit der Haufenmasse zusammenhängt.

Die wahrscheinlichste Quelle der von Kaiser postulierten Aufheizung wären Supernovae. Eine rasche Folge von Supernovae-Explosionen treibt nämlich Materie aus den Galaxien heraus und erhöht so nicht nur die Energie des intergalaktischen Mediums, sondern auch den Anteil schwerer Elemente. Röntgensatelliten haben gezeigt, dass das Gas in Galaxienhaufen tatsächlich angereichert ist – und zwar unabhängig vom Alter der Haufen. Dieser Befund weist darauf hin, dass die Anreicherung in einer frühen Phase der Haufenentwicklung stattfand. Supernovae würden dies zwanglos erklären. Denn die erste Generation von Sternen, die in einer Galaxie entsteht, explodiert bereits nach wenigen Millionen Jahren.

Der stärkste Hinweis auf den Supernova-Mechanismus stammt von direkten Beobachtungen von fernen Zwerggalaxien, in denen gerade Sterne in großer Anzahl entstehen: Wegen ihrer recht geringen Masse sollte ihr Aufbau durch explodierende Sterne relativ leicht gestört werden können. Ein Astronomenteam um Max Pettini von der Universität Cambridge, Steidel und Alice E. Shapley vom California Institute of Technology werteten Spektren dieser Galaxien im sichtbaren und infraroten Licht aus. Die sichtbaren Spektren enthielten zwei Sätze von Linien, einen von Wasserstoff in Emission, einen anderen von schweren Elementen, die das Licht von Objekten dahinter absorbierten. Die Infrarotspektren enthielten einen Satz von Linien, die Gasnebel innerhalb der Galaxie emittierten.

Das Team stellte fest, dass diese drei Sätze von Linien unterschiedlich rotverschoben sind: Die schweren Elemente zeigen eine geringere Rotverschiebung als die Galaxie selbst, der Wasserstoff jedoch eine stärkere. Das heißt: Relativ zum Zentrum der Galaxie bewegen sich die schweren Elemente mit etwa 300 Kilometer pro Sekunde auf uns zu, während sich der Wasserstoff mit der gleichen Geschwindigkeit von uns fortbewegt.

Galaxien wehen Wasserstoff und schwerere Elemente weit in den intergalaktischen Raum

Dieser seltsame Befund kam unerwartet. Am einfachsten lässt er sich durch Materie erklären, die in alle Richtungen aus der Galaxie herausströmt – ein kosmischer Wind sozusagen, der in den intergalaktischen Raum hinausbläst. Dieser Ausfluss enthält sowohl schwere Elemente wie auch Wasserstoff, aber in manchen Regionen sind die schweren Elemente leichter zu sehen, in anderen der Wasserstoff. Damit die schweren Elemente sichtbar werden, müssen sie zwischen uns und dem Großteil der Galaxie liegen: Sonst gäbe es gar kein Licht, das sie absorbieren könnten. Also müssen sie sich vom Zentrum der Galaxie weg bewegen. Für den Wasserstoff gilt entsprechend: Er muss sich ebenfalls von der Galaxie fortbewegen, aber in die von der Erde abgewandte Richtung. So wird seine Emission jenseits der Wellenlänge verschoben, bei der Materie dazwischen die Strahlung absorbieren könnte (siehe Kasten rechts).

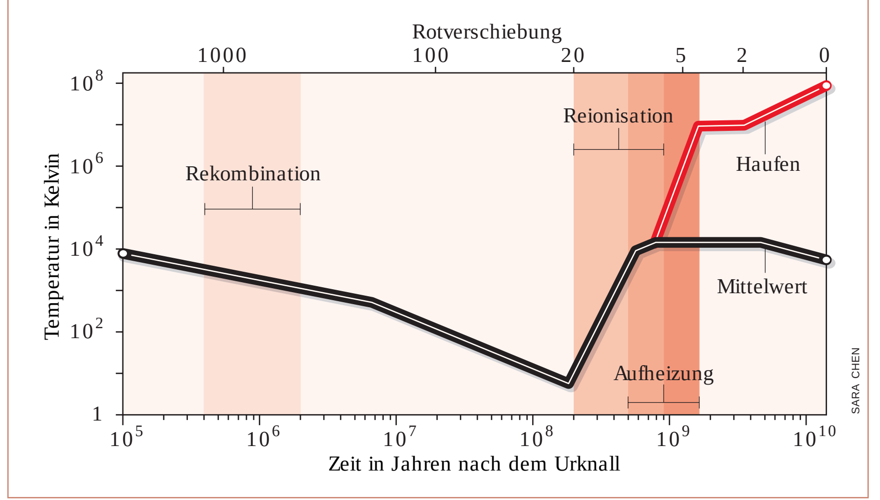
Dieses spektrale Muster wurde in allen fernen Zwerggalaxien gefunden, die überhaupt daraufhin untersucht werden können: Mithin sind solche Materieausflüsse häufig im Universum. Auch bei näheren Galaxien haben Astronomen gewaltige Blasen austretender Materie gefunden. Ein besonders dramatischer Fall ist die Zwerggalaxie NGC 1569, wie Crystal Martin von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und ihre Mitautoren kürzlich berichteten. Mit dem Röntgensatelliten Chandra fanden die Astronomen große Mengen Sauerstoff und andere schwere Elemente, die in Blasen Millionen Grad heißen Gases aus der Galaxie austreten.

Diese Winde haben die dichtesten Regionen des intergalaktischen Mediums aufgemischt und weite Bereiche des Alls magnetisiert. Sie könnten sogar die Bildung kleiner Galaxien unterdrückt haben. Die Auswirkungen auf das intergalaktische Medium waren weitaus krasser als diejenigen durch die frühere Reionisation. Während diese nur die Bildung von Galaxien mit weniger als ein paar hundert Millionen Sonnenmassen unterdrückte, könnten die Ausflüsse noch zehnmal größere Galaxien zermalmt haben. Vielleicht liegt darin die Antwort auf eines der großen Rätsel der modernen Kosmologie: Den herkömmlichen Modellen der Strukturbildung zufolge sollte es nämlich viel mehr kleine Galaxien geben als tatsächlich vorhanden sind (siehe „Über den Ursprung der Galaxienarten", SdW 09/2002, S. 54).

Jede Generation kosmischer Objekte verändert also das intergalaktische Medium – das wiederum die Eigenschaften der nächsten Generation bestimmt. Die Quellen, die das Universum reionisierten, erzeugten genügend thermischen Druck, um ihre eigene Bildung zu regulieren, und die Winde von Starburst-Galaxien könnten heftig genug gewesen

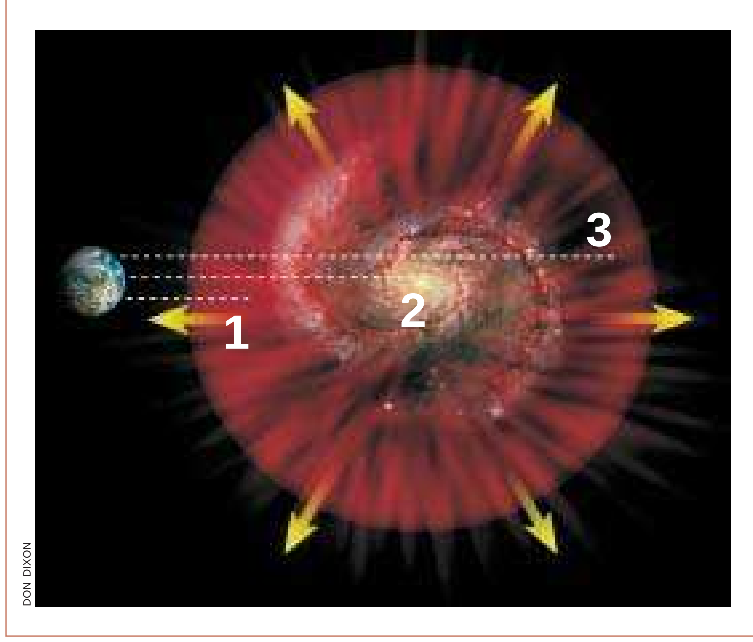
Veränderungen im intergalaktischen Gas

Die thermische Geschichte des intergalaktischen Mediums lässt auf drei wichtige Übergänge schließen. Offenbar haben sich das intergalaktische Gas und die Bildung kosmischer Strukturen wie etwa der Galaxienhaufen wechselseitig beeinflusst. Beobachtungen zufolge fanden die Übergänge bei bestimmten Rotverschiebungen statt, denen (mit einer gewissen Unsicherheit) bestimmte Zeiten zuzuordnen sind.



Der Wind aus den Galaxien

Der überzeugendste Beleg, dass Galaxien Materie in den interstellaren Raum blasen, stammt aus ihren Spektren. Der Wind verrät sich als Trio von Spektrallinien, welche die Vorderseite (**1**), das Zentrum (**2**) und die Rückseite (**3**) der Galaxie widerspiegeln: Zwei erscheinen in Emission (Spitze im Spektrum), eine in Absorption (Delle im Spektrum).

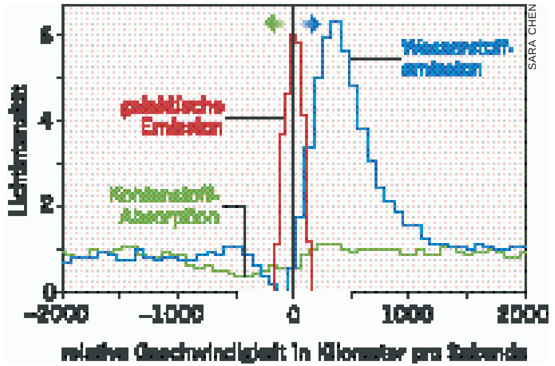


DON DIXON

1. Auf dem Weg zur Erde passiert das galaktische Licht schwere Elemente wie Kohlenstoff, die bestimmte Wellenlängen absorbieren. Diese Materie bewegt sich auf uns zu, sodass die Absorption relativ zur Geschwindigkeit der Galaxie zu einer negativen Geschwindigkeit verschoben ist.

2. Nebel innerhalb der Galaxie senden infrarotes Licht aus, das als Referenzpunkt dient.

3. Wasserstoff auf der erdabgewandten Seite der Galaxie strahlt Licht aus. Die Bewegung des Wasserstoffs von uns fort verschiebt die Absorption relativ zur Galaxie zu positiven Geschwindigkeiten – und verhindert zugleich, dass diese Emission von der Galaxie selbst wieder absorbiert wird.



sein, um die Entstehung anderer solcher Galaxien zu unterdrücken (siehe „Das Gas zwischen den Sternen“, Spektrum der Wissenschaft 03/2002, S. 30). Derlei Rückkopplungen scheinen ein wahrhaft universeller Mechanismus zu sein – sie sind offenbar auf allen Größenskalen der astronomischen Forschung wirksam.

In diesen vier Haupttypen von Beobachtungen gibt es stürmische Fortschritte. Messungen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zum Beispiel sind bereits empfindlich genug geworden, um eine leichte Störung durch das intergalaktische Medium nachzuweisen. Zonen ungleichmäßiger Reionisation sollten einige der Mikrowellenphotonen streuen, und heiße Gebiete des intergalaktischen Mediums, etwa Galaxienhaufen, sollten die Strahlung weiter verzerren. Dieses letztere Phänomen – Fachleuten als Sunjajew-Seldowitsch-Effekt bekannt – wurde bereits in einzelnen Haufen untersucht, und seine Auswirkungen auf größerer Skala wurden möglicherweise diesen Sommer mit dem Cosmic Background Imager entdeckt, einem speziellen Radioteleskop zur Erforschung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Mit einer Variante der Quasar-Absorptions-Technik gelangen auch Erkenntnisse über das intergalaktische Medium in unmittelbarer Nachbarschaft des Milchstraßensystems: Ein Team um Kenneth R. Sembach vom Space Telescope Science Institute fand mit dem Satelliten Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (Fuse) Hinweise, dass nahe Gaswolken ähnlich ungleichmäßig verteilt sind, wie man es von der netzartigen Struktur zwischen fernen Galaxienhaufen kennt, und dass sie sich durch ein Millionen Grad heißes Medium bewegen, ähnlich wie das Gas innerhalb von Galaxienhaufen. Die Lokale Gruppe von Galaxien, zu der unser Milchstraßensystem gehört, könnte mithin von einer heißen Hülle aus Gas umgeben sein, deren Eigenschaften sowohl den diffusesten wie den dichtesten Regionen des intergalaktischen Mediums entsprechen. Ähnliche heiße Regionen könnten eine bisher unbekannte Komponente des intergalaktischen Mediums darstellen – und einen Großteil seiner Masse ausmachen.

Die neuen Forschungsergebnisse machen eines klar: Wir haben gerade erst begonnen, die Geschichte des intergalaktischen Mediums zu schreiben, und neue Überraschungen erwarten uns. Wir sind aus der Umgebung des Sonnensystems in die Tiefen der einsamsten Regionen vorgedrungen, die wir uns vorstellen können. Aber unsere Augen gewöhnen sich gerade erst an die unerwartete und komplexe Schönheit des kosmischen Spinnennetzes, das sich über die leersten Plätze des Universums erstreckt. ■




Evan Scannapieco *(links) forscht an der Arcetri-Sternwarte in Florenz und dem Institut für Astrophysik in Paris.* ***Patrick Petitjean*** *(rechts) ist Vizedirektor des Instituts für Astrophysik in Paris und Leiter des Intergalactic Medium European Training Network; zusammen mit Scannapieco hat er die Verklumpung schwerer Elemente untersucht, die in Quasarspektren beobachtet wird.* ***Tom Broadhurst****, der an der Hebräischen Universität Jerusalem lehrt, führte gemeinsam mit Scannapieco die ersten theoretischen Analysen darüber durch, wie galaktische Ausflüsse die Bildung anderer Galaxien beeinflussen.*

BIOMECHANIK

Schabe hält Raketenschub stand

Was hat die Schabe dem Menschen voraus? Sie lässt sich nicht aus der Bahn werfen: Ein laufender Mensch gerät durch einen kräftigen Stoß in die Seite ins Straucheln, eine Kakerlake dagegen rennt unbeirrt weiter, selbst wenn eine Miniaturrakete auf ihrem Rücken quer zur Laufrichtung gezündet wird. Worauf beruht diese enorme Trittsicherheit? Nicht auf einer reflexartigen Reaktion, vermuten Robert J. Full von der Universität von Kalifornien in Berkeley und Devin L. Jindrich von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), die das Raketenexperiment durchgeführt haben. Denn der Seitenschub dauert nur eine Schrittlänge, und die Schaben gleichen ihn aus, ohne ihre Gangart und Geschwindigkeit zu ändern oder auch nur einen Fuß zur Seite zu setzen. Nervenreflexe wären dafür zu langsam. Stabilisiert wird das Krabbeltier vielmehr durch das optimale Zusammenspiel von Muskulatur und Außenskelett. Dieses hält, wie mathematische Modelle und Versuche an Schabenbeinen bestätigten, dank seiner viskoelastischen Eigenschaften ähnlich wie eine seitlich angebrachte Feder das Tier in der Spur. Andere Forscher setzten die Erkenntnisse bereits in die Praxis um und bauten einen sechsbeinigen Miniroboter, der ohne zusätzliche Computersoftware zur Stabilisierung behände durch unwegsames Gelände krabbelt. *(Journal of Experimental Biology, Bd. 205, S. 2803)*



DEVIN JINDRICH

Selbst die Schubkraft einer Rakete bringt die Schabe nicht ins Straucheln.

ARCHÄOLOGIE

Gnadenloser Kampf zweier Maya-Supermächte

Für die Archäologen war der Sturm ein Geschenk des Himmels – er legte im Urwald von Guatemala eine Treppe mit Inschriften frei, die über bisher unbekannte Ereignisse aus einem 60-jährigen Abschnitt der Maya-Geschichte berichten. Zugleich wecken die Hieroglyphen auf den Stufen der Pyramide bei Dos Pilas Zweifel am derzeitigen Bild der mittelamerikanischen Hochkultur: Nicht viele unabhängige Kleinstaaten rivalisierten miteinander, sondern zwei Supermächte standen sich unversöhnlich gegenüber und verlangten von ihren Vasallen unbedingte Gefolgschaft. Dos Pilas war ein solcher Marionettenstaat, dessen König Balaj Chan K'awiil zunächst mit der Großmacht Tikal paktierte, über die sein Bruder herrschte. Nachdem K'awiil von dem konkurrierenden Machtzentrum Calakmul besiegt worden war, wechselte er jedoch das Lager und begann einen Krieg gegen seinen Bruder, den er nach einem Jahrzehnt erfolgreich beendete – mit einem blutigen Triumphfest, bei dem er die abgeschlagenen Köpfe der Besiegten zur Schau stellte. Laut Federico Fahsen von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee), der die Inschriften übersetzte, war dieser Bruderkrieg von den Supermächten erzwungen. Deren Dauerstreit könnte auch den bislang rätselhaften Untergang der Mayakultur erklären. *(National Geographic 10/2002, S. 8)*



NATIONAL GEOGRAPHIC

Die Hieroglyphen erzählen vom Bruderkrieg im Spannungsfeld zweier Maya-Großmächte.

PALÄONTOLOGIE

Raubsaurier mit Hasenzahn

Der schreckliche *Tyrannosaurus rex* hatte einen schrecklich aus der Art geschlagenen Vetter: *Incisivosaurus gauthieri*. Der war offenbar harmlos wie ein Hase. Chinesische Forscher um Xing Xu vom Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie in Peking fanden jetzt seinen fast kompletten Schädel samt einiger Wirbelfragmente in der Nähe der Stadt Beipiao im Nordosten Chinas. Auf 128 Millionen Jahre geschätzt, ist *Incisivosaurus* das älteste bekannte Fossil eines Oviraptors. Charakteristisch für diese Tiergruppe war ihr seltsam geformter Vorderschädel, der einem Papageienschnabel ähnelte. Mit ihm plünderten sie vermutlich fremde Nester, worauf der Name „Eierräuber" anspielt. Die Oviraptoren zählten zu den Theropoden: zweibeinigen Raubsauriern mit kurzen Armen und Krallenhänden. Damit waren sie entfernte Verwandte von *Tyrannosaurus rex*. Doch der neu entdeckte Oviraptor hatte ganz und gar nichts Räuberisches an sich: Mit seinen zwei Hasen- und den schmalen Backenzähnen mümmelte er wahrscheinlich friedlich Grünzeug. *(Nature, 19.9.2002, S. 291)*



Die beiden Vorderzähne stempeln den „Raubsaurier" *Incisivosaurus gauthieri* zum harmlosen Pflanzenfresser.

LINKS: PORTIA SLOAN FOR IVPP (INSTITUTE OF VERTEBRATE PALEONTOLOGY AND PALEOANTHROPOLOGY); RECHTS: THIBAUD MONNIN, UNIVERSITÄT SHEFFIELD

ASTROPHYSIK

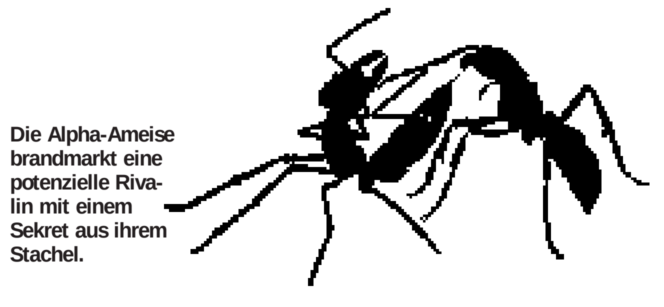
Polarisiertes Urknallecho

Gigantische Gravitationswellen wogten kurz nach dem Urknall durch den rasant expandierenden Kosmos. Jetzt ließ sich gleichsam ihr spätes Echo in der kosmischen Hintergrundstrahlung aufspüren. Dabei handelt es sich um eine Art Nachglühen des Urknalls im Mikrowellenbereich, das fast gleichmäßig das gesamte Universum durchzieht. John Carlstrom und seine Mitarbeiter an der Universität Chicago vermaßen mit Hilfe des Radio-Teleskops „Dasi“ der Amundsen-Scott-Station am Südpol erstmals die Polarisation der äußerst schwachen Mikrowellen aus dem Weltall. Ausgesandt wurden sie einst von einem kosmischen Plasma aus subatomaren Partikeln, das rund 400000 Jahre nach dem Urknall das Universum erfüllte. Ihre Polarität gibt nun Aufschluss über die Bewegungen dieses Plasmas im jungen Kosmos sowie über die Struktur der hindurchlaufenden Gravitationswellen. Die Unterscheidung beider Effekte ist, selbst 14 Milliarden Jahre nach ihrer Entstehung, noch möglich: Während Dichtevariationen ringförmige oder radiale Polarisationsmuster erzeugen, verraten sich Gravitationswellen durch rechts- oder linksdrehende Wirbel.

SOZIOBIOLOGIE

Tödliches Stigma

Üblicherweise muss das dominierende Alpha-Tier seine Position immer wieder im Zweikampf gegen Rivalen verteidigen. Nicht so im hierarchischen Staate der *Dinoponera quadriceps*. Bei dieser südamerikanischen Ameisenart herrschen Verhältnisse wie am Hof eines mittelalterlichen Fürsten, der seine Günstlinge geschickt zur Sicherung seiner Machtposition einspannte. Das konnten Forscher um Thibaud Monnin von der Universität Sheffield jetzt beobachten. *D. quadriceps* lebt ohne Königin. Stattdessen sorgen etwa achtzig Arbeiterinnen für eine Alpha-Ameise, die als einzige die Fähigkeit zur Fortpflanzung hat. Daneben gibt es drei bis fünf hochrangige Stellvertreterinnen, die alle Schwestern des Alpha-Tiers sind. Bei dessen Tod rückt eine von ihnen nach. Doch manchmal mag sie nicht so lange warten. In diesem Fall zückt die Alpha-Ameise ihren Stachel und beschmiert die Aufrührerin mit dem Sekret aus einer Hinterleibsdrüse. Daraufhin eilen ihr bis zu sechs Arbeiterinnen zu Hilfe, beißen sich an der Putschistin fest und halten sie so bis zu vier Tage lang gefangen. Im günstigsten Fall verliert die Ameise nur ihren Rang, schlimmstenfalls ihr Leben. Der scheinbar selbstlose Einsatz der Arbeiterinnen für das dominierende Tier macht soziobiologisch Sinn: Als direkte Nachkommen der Alpha-Ameise sind sie näher mit ihr verwandt als mit einer potenziell nachrückenden Schwester von ihr. *(Nature, 5.9.2002, S. 61)*



Die Alpha-Ameise brandmarkt eine potenzielle Rivalin mit einem Sekret aus ihrem Stachel.

TEILCHENPHYSIK

50000 Spiegelbilder des Wasserstoffatoms



In dieser Apparatur erzeugten Wissenschaftler erstmals größere Mengen Antiwasserstoff.

Zu jedem Teilchen gibt es ein „spiegelbildliches“ Pendant. Diese Antiteilchen kommen in unserer Welt jedoch praktisch nicht vor; sie können nur in Beschleunigern erzeugt werden. Antiatome waren lange Zeit sogar überhaupt nicht bekannt. Erst vor sieben Jahren gelang es am europäischen Teilchenlaboratorium Cern in Genf, eine Hand voll Antiwasserstoffatome herzustellen, in denen ein Positron (Antielektron) ein Antiproton umkreist. Nun konnte die internationale Forschergruppe „Athena“ am Cern erstmals auch eine größere Menge dieser exotischen Paare kreieren. In einem trickreichen Experiment schuf sie rund 50000 davon – mittels einer Apparatur zum Abbremsen von Antiprotonen sowie eines radioaktiven Isotops, das beim Zerfall Positronen aussendet. Damit verfügen die Forscher nun endlich über genug Antiwasserstoff, um herauszufinden, ob er tatsächlich ein vollkommenes Spiegelbild des Wasserstoffs ist. Unterschiede, so klein sie auch sein mögen, könnten erklären, warum unsere Welt nur aus Materie besteht, obwohl theoretisch nach dem Urknall genauso viel Antimaterie entstanden sein sollte. *(Cern, 18.9.2002)*

GENETIK

Taktgeber aus Muskelzellen

Ein gebrochenes Herz kann man nicht reparieren – doch ein aus dem Tritt geratenes lässt sich mit einem Schrittmacher wieder auf Trab bringen. Ein derartiges mechanisches Gerät reagiert allerdings nur beschränkt auf körperliche Belastung, die einen schnelleren Rhythmus erfordert, und braucht alle paar Jahre einen Batteriewechsel. Deshalb sind Forscher von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) auf eine biologische Alternative verfallen: die Umprogrammierung normaler Herzmuskel- in taktgebende Schrittmacherzellen. Dahinter steht die Beobachtung, dass im Embryo noch alle Herzzellen spontan kontrahieren können. Erst später verwandeln sie sich in wenige tausend Schrittmacher- und viele Millionen einfache Herzmuskelzellen, die sich nur auf Befehl zusammenziehen. Die Wissenschaftler vermuteten, dass auch bei diesen die Fähigkeit zur spontanen Kontraktion noch latent vorhanden ist und lediglich durch einen Kaliumgradienten unterdrückt wird. Deshalb schleusten sie ein Gen in Herzzellen von Kaninchen ein, das bestimmte Ionenkanäle blockiert, sodass sich kein hemmender Gradient aufbauen kann. Tatsächlich begann sich ein Teil dieser Zellen daraufhin von sich aus zusammenzuziehen. Allerdings schlagen die neuen biologischen Schrittmacher noch unkoordiniert und an nicht vorherbestimmbaren Stellen. *(Nature, 12.9.2002, S. 132)*

TRANSPLANTATIONSMEDIZIN

Wege aus dem Organmangel

Spenderorgane sind oft die letzte Rettung, aber leider rar. Innovative chirurgische Methoden und Änderungen der rechtlichen Grundlagen können inzwischen mehr Patienten zu einem zweiten Leben verhelfen.

Von Giuseppe Remuzzi, Norberto Perico, Giuseppe Locatelli und Bruno Gridelli

Erfolg schafft oft eigene Probleme. Auf kaum einem anderen Feld der Medizin wurden binnen weniger Jahrzehnte so weit reichende Fortschritte erzielt wie bei der Transplantation lebenswichtiger Organe. Noch Anfang der 1960er Jahre durfte kaum jemand auf langfristige Rettung hoffen, wenn beispielsweise beide Nieren versagten. Erst im April 1962 gelang dem Team von Joseph E. Murray am Brigham and Women's Hospital in Boston ein Durchbruch: Es verpflanzte die Niere eines Toten erfolgreich einem nicht verwandten Empfänger, indem es die Abstoßung durch ein Medikament unterdrückte. Mittlerweile ist die Nierentransplantation weltweit eine Standardtherapie und hat hunderttausende Patienten von der Dialysemaschine befreit.

Zwar verpflanzten noch im selben Jahrzehnt Chirurgen erstmals eine Leber und ein Herz, doch blieb dieser operative Ersatz noch bis in die 1980er Jahre im experimentellen Stadium, war also kaum eine Option für Patienten. Auch dies hat sich grundlegend geändert. Ähnliches gilt für Lunge und Bauchspeicheldrüse.

Die Zahlen sprechen für sich: Allein in Deutschland sind in all den Jahren bis Ende 2001 insgesamt 62452 Organe transplantiert worden, darunter 44080 Nieren, 8479 Lebern und 7076 Herzen. Die meisten Empfänger können ein weitgehend normales Leben führen. Bis auf die Lungen funktionieren in Deutschland nach fünf Jahren weiterhin rund zwei Drittel der Organe, wenn sie von toten Spendern stammten und erstmals übertragen wurden. Diese Erfolge sind die Früchte intensiver Forschung, insbesondere zu den Vorgängen im Immunsystem. Ein enormer Gewinn war die Entwicklung von Medikamenten, die das Abstoßen des fremden Gewebes gezielter und wirksamer verhindern.

Mit immer besseren Überlebenschancen erweiterte sich der Kreis der in Frage kommenden Patienten zusehends – und gerade das hat den Mangel an Spenderorganen noch verschärft. Zum Beispiel sterben allein in den USA jährlich rund 3000 Menschen, während sie auf ein Transplantat warten; an die 100000 Patienten erleben nicht einmal ihre Aufnahme in eine Warteliste. Jährlich werden dort zwar vier Prozent mehr Nieren verpflanzt – die ohnehin lange Warteliste hierfür wächst aber weit ▶



Prüfung der Gewebeverträglichkeit: Sie ist der erste Schritt zur Organverpflanzung. Eine möglichst hohe Übereinstimmung der immunologischen Merkmale von Spender und Empfänger ist entscheidend für den Erfolg einer Transplantation.

ED YOUNG / SPL / GRAZIA NERI



schneller: um etwa elf Prozent. Eine weitere Verschärfung ist abzusehen.

Solche Diskrepanzen – wenn auch nicht gleichen Ausmaßes – bestehen praktisch bei allen Organen. Europäischen Ländern ergeht es kaum anders, selbst bei internationaler Kooperation. Schon 1967 wurde „Eurotransplant“ ins Leben gerufen. Die gemeinnützige Stiftung mit Sitz im niederländischen Leiden vermittelt und koordiniert heute den Organaustausch zwischen Belgien, Deutschland, Luxemburg, den Niederlanden, Österreich und Slowenien. Beteiligt sind Transplantationszentren, Laboratorien für Gewebetypisierung und Krankenhäuser mit Intensivstationen. Trotzdem konnten in diesen Ländern im Jahre 2000 nur 5212 „Leichenorgane“ eingepflanzt werden, während 14 237 Patienten auf der Warteliste standen (siehe Kasten Seite 50). Speziell in Deutschland hat sich die Situation in den letzten Jahren teils etwas entspannt, teils weiter verschärft, wie die Übersicht der Deutschen Stiftung Organtransplantation für 2001 zeigt, die sowohl die Organe von hirntoten wie auch die von lebenden Spendern berücksichtigt. Kritisch ist es insbesondere bei Niere und Leber:

➤ Mit 2346 wurde zwar eine Rekordzahl von Nieren verpflanzt. Doch die Zahl der gemeldeten Anwärter, die gesund genug für eine Operation blieben, hat sich gegenüber dem Vorjahr nur geringfügig auf 9547 verringert, weil anteilig mehr Patienten mit Nierenversagen in die Warteliste aufgenommen wurden.

➤ Die Zahl der Lebertransplantationen lag mit 757 etwa auf dem Niveau der Vorjahre. Aber seit 1994 steigt die Zahl der neuen angemeldeten Patienten steil an, während die der Spenderorgane stagniert.

IN KÜRZE

Organe für Transplantationen sind knapp. Gesetzliche Maßnahmen können, müssen aber nicht den Prozentsatz an Organspenden erhöhen. Es gilt also, das vorhandene „Material“ auch besser auszunutzen. Neuere Studien belegen: Zwei alte Spendernieren, gemeinsam transplantiert, können manchmal so viel leisten wie eine einzige optimale Niere. Bei richtiger Auswahl brauchen sie also nicht verworfen zu werden. Ein weiteres Beispiel: Der kleinere Lappen einer Spenderleber reicht für ein Kind, der größere für einen Erwachsenen. Teilen bringt hier mehr.



AP PHOTO / ARG

Kapstadt im Dezember 1967: Der südafrikanische Chirurg Christiaan Barnard (an der Tafel) erklärt einer Gruppe von Journalisten den Ablauf der ersten Herztransplantation der Medizingeschichte. Im Krankenhaus Groote Schuur hatte er das Organ einer jungen Frau, die bei einem Verkehrsunfall ums Leben gekommen war, einem todkranken Mann eingepflanzt. Dieser starb nach 18 Tagen an einer Lungenentzündung. Technische Herz-Unterstützungssysteme machen inzwischen manche Transplantation überflüssig.

Dem Organmangel könnten theoretisch Organe von Tieren abhelfen, deren Gewebemerkmale durch Genmanipulation menschenähnlicher gemacht werden; denn normalerweise provoziert artfremdes Gewebe besonders heftige Abstoßungsreaktionen. Erste genmanipulierte Schweine existieren zwar bereits. Mit der Behandlung von Patienten durch solche „Xenotransplantate“ ist aber in absehbarer Zeit nicht zu rechnen.

Als direktester Weg zu mehr Spenderorganen werden geeignete gesetzliche Maßnahmen angesehen. Nach Umfragen befürworten es in Deutschland mehr als die Hälfte der Menschen, mit ihren Organen nach dem Tod andere Menschen zu retten. Die wenigsten halten dies aber schriftlich fest. Um die Entnahme von Geweben und Organen auch unter bestimmten anderen Voraussetzungen zu erlauben, haben inzwischen etliche Länder einschlägige Gesetze erlassen. Diese basieren im Prinzip entweder auf einem „angenommenen Einverständnis“ oder auf einer „erweiterten Zustimmung“.

Stützt sich das Gesetz auf das erste Konzept, dann dürfen einem Menschen im Falle seines Hirntodes Organe und Gewebe entnommen werden – sofern er dem Eingriff nicht zu Lebzeiten bei einem Referenzzentrum ausdrücklich widersprochen hat (deshalb auch der Begriff Widerspruchslösung). Die Ärzte müssen nicht einmal unbedingt die Angehörigen von dem Vorhaben in Kenntnis setzen. Die Anzahl der hinterlegten Widersprüche scheint bei dieser Regelung im Allgemeinen relativ gering zu sein.

Bessere Gesetze – bessere Spenderbilanz?

Beim zweiten Konzept muss der Verstorbene zu Lebzeiten eine Organspende schriftlich befürwortet oder abgelehnt haben, ansonsten können die nächsten Angehörigen, wenn nichts Mündliches vorliegt, in seinem Sinne entscheiden. Diese verweigern in der psychisch belastenden Situation eines Todesfalles eher ihre eigene Zustimmung, wenn sie den mutmaßlichen Willen nicht kennen. In der Bundesrepublik hatten 2001 nur 0,5 Prozent der hirntoten potenziellen Spender eine schriftliche Ablehnung und 17,8 Prozent eine mündliche hinterlassen.

Gibt es so etwas wie das bessere Konzept? Betrachtet man in Europa und Nordamerika die sechs Länder mit dem höchsten Prozentsatz an Organspenden von Hirntoten, dann gehen vier bei ihren Regelungen von einem „angenommenen Einverständnis“ aus. Auf diesem Konzept basierte auch der erste Gesetzentwurf in der Bundesrepublik, der aber 1978 wegen



Zwei Chirurgen entnehmen eine Spenderniere. Ein hirntoter Spender liefert zwei Nieren, von denen gewöhnlich jede einem anderen Empfänger eingesetzt wird. Bei schwachen Spendernieren kann ein Empfänger beide erhalten; ihre Gesamtleistung reicht nach neueren Erkenntnissen dann oft aus.

Bedenken des Bundesrates scheiterte. In der DDR galt bis 1990 auf Grund einer Regierungsverordnung ebenfalls ein Widerspruchsmodus. Nach der Wiedervereinigung war Deutschland über Jahre einer der letzten europäischen Staaten ohne eigenständige Regelung der Transplantationen. Schließlich entschieden sich Bundestag und Bundesrat mit breiter Mehrheit für eine „erweiterte Zustimmung“. Diese Lösung trat am 1. Dezember 1997 in Kraft. Seither ist die Quote der Organspenden in den neuen Bundesländern deutlich gestiegen, nicht aber in den alten. In Italien gilt nach einem Gesetz von 1999 nur eine vorläufige Regelung: Liegt keine Erklärung der betreffenden Person vor, können ihre Angehörigen einer Organentnahme widersprechen.

Internationale Vergleiche allein auf der Basis gesetzlicher Regelung sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, wenn man die „beste“ Lösung ermitteln will. So hält Spanien – ein Land, das die Entnahme erlaubt, solange der Verstorbene nicht zu Lebzeiten widersprochen hatte – zwar die Spitzenposition bei Organspenden. Gängige Praxis ist dort aber das eigentlich strengere Prinzip, dass entweder der Spender sich vorab dazu bereit erklärt hatte oder seine Angehörigen zugestimmt haben.

Wie sieht es im Bereich von Eurotransplant aus? Bezogen auf die jeweilige Einwohnerzahl wurden in Österreich und Belgien wesentlich mehr Nieren, Herzen und Lebern gespendet und transplantiert als in der Bundesrepublik und den Niederlanden. Selbst innerstaatlich, also unter genau gleichen gesetzlichen Bedingungen, können starke Unterschiede bestehen. Mecklenburg-Vorpommern verzeichnete im Jahre 2001 mehr als 25 Organspenden pro Million Einwohner, Nordrhein-Westfalen nur rund neun.

Wer eine neue Niere braucht, ist nun nicht unbedingt auf den Tod eines passenden Spenders angewiesen. Ein gesunder Mensch kann eine seiner beiden Nieren spenden; denn die verbliebene reicht aus. Die so genannte Lebendspende ist in Deutschland aber nur zwischen nahen Angehörigen erlaubt. Darunter fallen beispielsweise auch Verlobte.

Bei Blutsverwandten bestehen einige Chancen, dass Gewebemerkmale gut übereinstimmen. Bei eineiigen Zwillingen sind diese sogar identisch. Tatsächlich fand die erste langfristig erfolgreiche Verpflanzung einer Niere zwischen eineiigen Zwillingen schon 1954 in Boston statt. Ausgeführt hatte sie ebenfalls das Team um Murray. Inzwischen trägt die Lebendspende dieses Organs wesentlich zur Erfolgsbilanz bei. In Deutschland stieg ihr Anteil an allen Nierentransplantationen von weniger als drei Prozent noch Anfang der 1990er Jahre auf durchschnittlich rund 16 Prozent in den vergangenen drei Jahren.

Literaturhinweise

Der Organspendeprozess: Ursachen des Organmangels und mögliche Lösungsansätze. Von Stefan M. Gold, Karl-Heinz Schulz und Uwe Koch, Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung, Köln 2001.

Strategies for Making More Organs Available for Transplantation. Von B. Gridelli und G. Remuzzi in: New England Journal of Medicine, Bd. 343, S. 404, 2000.

*Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis“*

Die Niere eines lebenden Spenders bringt kurz- wie langfristig bessere Ergebnisse. Eine aktuelle US-amerikanische Analyse von fast 94000 Fällen ergab, dass nach einem Jahr 93,9 Prozent solcher Transplantate ihre Funktion erfüllten, aber nur 87,7 Prozent der aus Hirntoten. Die Halbwertszeit, nach der die Hälfte der eingepflanzten Nieren noch arbeiten, betrug bei den Lebendspenden 21,6 Jahre gegenüber nur 13,8 bei den anderen. Nach einer westeuropäischen Studie, bei der 27683 Nierentransplantationen in Deutschland ausgewertet wurden, lag nach fünf Jahren die Funktionsrate der Lebendspenden bei 80 und die der Leichenorgane bei 66 Prozent.

Allerdings bestehen immer noch gewisse Risiken für den Spender: wie bei jeder Operation, aber auch, weil seine verbliebene Niere später einmal versagen könnte. Die operationsbedingten Erkrankungen liegen hier bei 1 bis 1,3 Prozent; weniger als 0,03 Prozent der Spender sterben im Zusammenhang mit dem Eingriff, wenn sie ordnungsgemäß ausgewählt werden. Um die kurzfristigen Risiken weiter zu verringern und den Spender zu schonen, entnehmen Chirurgen die Niere neuerdings manchmal schon mittels so genannter minimal invasiver Techniken. Der Spender erleidet dadurch weniger Schmerzen und kann durchschnittlich schon nach 2,7 Tagen das Krankenhaus verlassen, bei offenem Eingriff erst nach 5,7 Tagen. Bei diesem Vergleich funktionierten nach einem Jahr von den endoskopisch entnommenen Nieren noch 97 Prozent, von den konventionell gewonnenen Lebendspenden 98 Prozent.



Alte Organe für Alte

Nicht jedes Organ – ob nun vor oder nach dem Tod bereitgestellt – taugt zur Transplantation. Insgesamt werden, salopp gesagt, die Spenderorgane immer älter. Transplantationsmediziner haben aber Vorbehalte, wenn der Spender älter als fünfzig Jahre ist. Tatsächlich sind die Nieren dann häufiger vorgeschädigt und weniger leistungsfähig. Nach der Verpflanzung kommt es – wie auch bei jüngeren Spendernieren, die länger als 24 Stunden gekühlt gelagert wurden – in etwa jedem zweiten Fall zu einer „Anurie“: Der Harn beginnt nicht gleich zu fließen. Solche Transplantate arbeiten mittel- oder langfristig betrachtet in der Regel schlechter. Nieren von betagten Spendern oder von Personen, die unter Bluthochdruck oder Diabetes leiden, neigen überdies zur „Proteinurie“: Im Urin tauchen dabei vorwiegend niedermolekulare Eiweißstoffe auf, die normalerweise zurückgehalten werden. Außerdem wird funktionelles Gewebe häufiger durch Bindegewebe ersetzt. Fachleute sprechen von einer Fibrose.

Darum verwenden viele Transplantationszentren Organe von Risikospendern lieber nicht. Eurotransplant startete jedoch 1999 ein Seniorenprogramm, bei dem Patienten über 65 Jahren Nieren von Hirntoten derselben Altersgruppe bekommen sollen („Old for Old“). Nach zehn solchen Operationen an der Universität Düsseldorf nahmen die Transplantate zwar häufiger als sonst ihre Funktion verspätet auf: Die Empfänger waren für durchschnittlich elf Tage auf eine Blutwäsche angewiesen und mussten auch länger als üblich im Krankenhaus bleiben. Aber in neun Fällen arbeitete die neue Niere schließlich zufrieden stellend.

Kandidaten und Patienten im Bereich von Eurotransplant 2000

Lücke im Organbedarf

Die Stiftung Eurotransplant vermittelt und koordiniert den Organaustausch zwischen mittlerweile sechs europäischen Ländern. Nach der Statistik der nichtkommerziellen Organisation für das Jahr 2000 war die Zahl der Anwärter auf eine Transplantation in vielen Bereichen erheblich höher als die der Operationen. Berücksichtigt sind allerdings nur die Organe hirntoter, nicht jene lebender Spender. Die kompletten Zahlen für 2001 standen bei Redaktionsschluss noch nicht fest. Damit keine Patienten auf der Warteliste versterben und beispielsweise die enorme Warteschlange bei Nieren abgebaut werden kann, sind nach der Deutschen Stiftung Organtransplantation 3500 Nieren jährlich nötig. Der Anteil der Lebendspende liegt für Nieren inzwischen bei rund 16 Prozent.

		Niere	Leber	Pankreas und Niere	Herz	Lunge	Herz und Lunge
Belgien und Luxemburg	Warteliste	702	80	16	30	27	3
	operiert	452	194	30	84	37	6
Deutschland	Warteliste	9510	600	153	381	270	31
	operiert	1641	692	232	407	147	11
Niederlande	Warteliste	1278	60	13	27	60	2
	operiert	369	126	18	39	16	1
Österreich	Warteliste	734	61	16	44	22	6
	operiert	328	147	29	86	57	2
Slowenien	Warteliste	102	2	0	7	0	0
	operiert	44	10	0	7	0	0

Einige Kliniken bestimmen bei Nieren von hirntoten Spendern, die über sechzig Jahre alt sind, vor der Entnahme den Grad der Glomerulosklerose, der narbigen Umwandlung des funktionellen Gewebes. Als geeignet gilt eine Niere für ein Einzeltransplantat nur, wenn nicht mehr als 15 Prozent ihrer Nierenkörperchen betroffen sind. Sechs Monate nach der Transplantation funktionierten 95 Prozent der danach ausgewählten Organe trotz anfangs erhöhter Anurie-Rate gut. Allerdings enthält das Blut mancher dieser Empfänger mehr Kreatinin als im Falle eines optimalen Transplantats. Dieses Stoffwechselprodukt der Muskeln geht ins Blut über und muss über die Nieren ausgeschieden werden. Ein erhöhter Blutwert deutet auf eine eingeschränkte Filtrationswirkung hin. Möglicherweise hält ein solches Organ weniger lange durch als ein fittes.

Ein Missverhältnis zwischen der Menge an aktiven Einheiten der Nieren und dem tatsächlichen Blutreinigungsbedarf des Körpers schädigt die Nieren letzten Endes irreversibel. Das weiß man aus Tierexperimenten. Solche Folgen einer Überlastung sollten sich aber verhüten lassen, indem man die potenzielle Filtrationsleistung von vornherein erhöht, also einem Empfänger nicht nur eine der suboptimalen Nieren eines hirntoten Spenders einpflanzt, sondern beide zugleich. Die auf diese Weise erhöhte Gesamtzahl von aktiven Einheiten dürfte einen fortschreitenden Funktionsverlust durch Überlastung verhindern oder zumindest verzögern, wenn weniger als je zwanzig Prozent des Gewebes beider Nieren inaktiv sind. Das müsste natürlich mit ausreichender Verlässlichkeit durch Gewebeuntersuchungen vor der Transplantation sichergestellt werden.

Zwei Alte sind so gut wie eine Junge

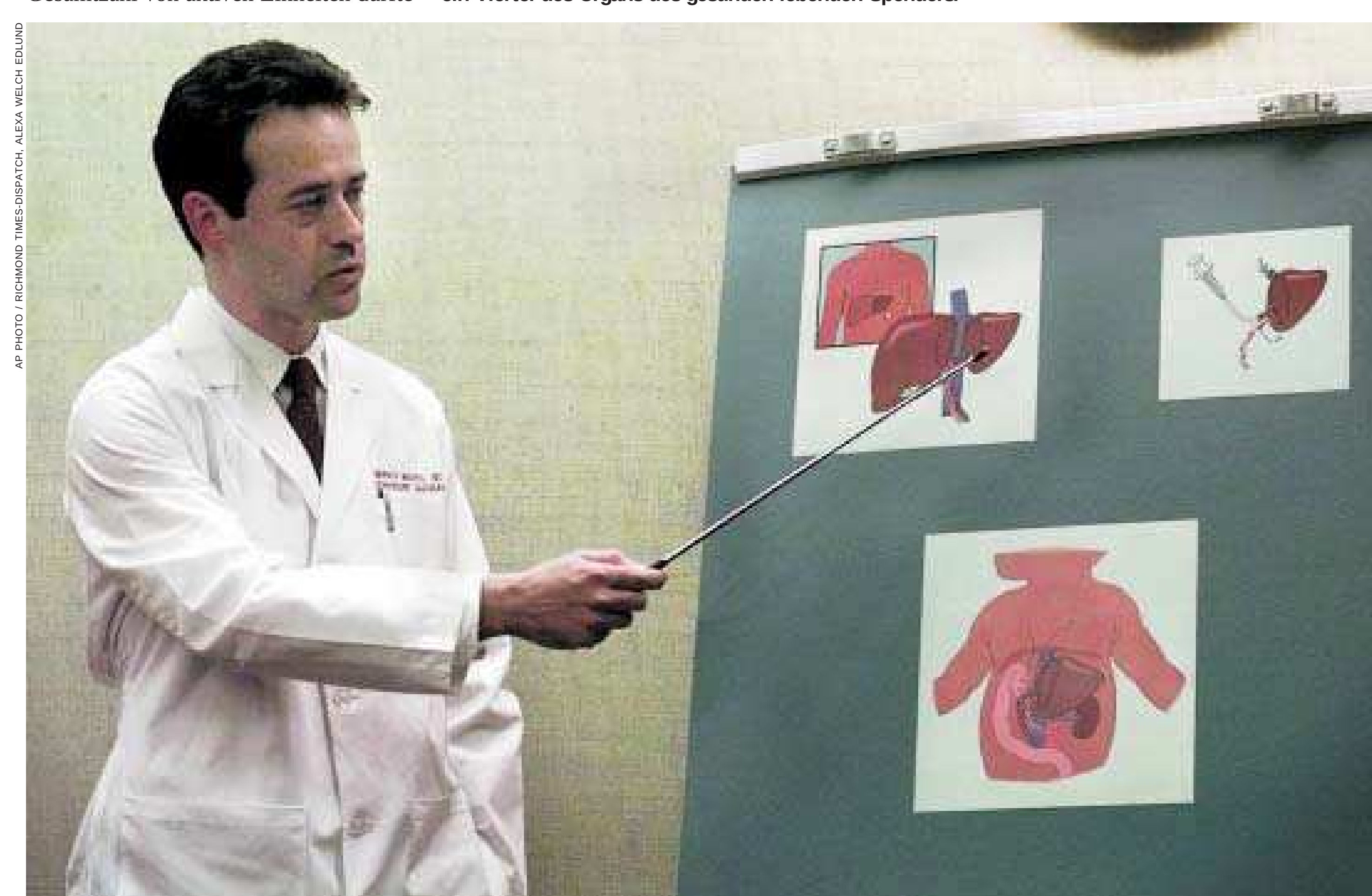
Einwenden ließe sich allerdings, dass die Einpflanzung zweier Nieren das Operationsrisiko des Empfängers erhöht, da der Eingriff naturgemäß länger dauert. Auch das Risiko, dass sein Körper das Transplantat abstößt, ist möglicherweise erhöht, weil das Immunsystem mit mehr fremdem Gewebe konfrontiert ist als bei einer Einzelniere.

Die nachträgliche Auswertung klinischer Studien unter diesem Aspekt brachte jedoch beruhigende Ergebnisse: Der aufwendigere Eingriff erwies sich als ausreichend sicher, und die Nierenwerte waren nach sechs Monaten gleich gut wie bei den Empfängern eines einzelnen voll funktionstüchtigen Organs.

Eine neuere Studie, bei der mehrere Zentren ihre Transplantat-Empfänger überwachten, bestätigte den günstigen Eindruck. Sechs Monate nach dem Eingriff waren keine Nachteile in den Kategorien Operationskomplikationen, Nierenfunktion und Abstoßungsreaktionen festzustellen. Zu diesem Zeitpunkt glänzten die Empfänger suboptimaler Transplantat-Paare sogar mit einem niedrigeren Kreatinin-Spiegel und besseren Blutdruckwerten als die Patienten der Kontrollgruppe, die eine einzelne voll funktionstüchtige Niere erhalten hatten.

Wie weit mehr Masse mangelnde Klasse auch längerfristig wettmachen, ja ihr manchmal sogar überlegen sein kann, zeigte eine andere Untersuchung. Verglichen wurden dabei teils einzeln, teils gemeinsam überpflanzte Nieren von über 54 Jahre alten Spendern. Doppeltransplantate produzierten nicht nur schneller wieder Harn, sondern funktionierten sogar zwei Jahre nach dem Eingriff besser – und das, obwohl in dieser Patientengruppe die Gewebe von Spender und Empfänger insgesamt weniger gut zusammenpassten als bei der Gruppe mit Einzeltransplantat. Ähnliche Erfolge brachten neuerdings sogar Organe von Spendern mit einem sehr hohen Alter von bis zu 89 Jahren – sofern nicht mehr als die Hälfte der Funktionseinheiten in den Nieren geschädigt waren.

Aus all dem ist zu schließen, dass „schwache“ Nieren, die normalerweise ▶



Eine Lebertransplantation von Onkel zu Neffe erläutert Amadeo Marcos vom Medical College der Virginia Hospitals. Der erst 22 Monate alte Junge erhielt ein Viertel des Organs des gesunden lebenden Spenders.

AP PHOTO / RICHMOND TIMES-DISPATCH, ALEXA WELCH EDLUND



AP PHOTO / DR. DAVID SACHS, HO

Eine experimentelle Transplantation von Schwein zu Schwein, 1995 von David Sachs vorgenommen: Der Bostoner Mediziner arbeitet wie weitere Forscher daran, Schweine durch Genmanipulation so zu verändern, dass sich ihre Organe besser als Transplantate für Menschen eignen. Vor allem werden mehr Nieren gebraucht.

als Einzeltransplantat ungeeignet wären, bei Doppeltransplantation durchaus auch langfristig Zufriedenstellendes leisten können.

Nicht weniger Vorbehalte bestanden früher gegen ein altes Herz oder eine alte Leber. Viele Chirurgen lehnten solche Organe ab, wenn der hirntote Spender älter als sechzig Jahre war. Sie befürchteten, altersbedingte Gewebeveränderungen würden die Funktion des Transplantats nach dem Einpflanzen zu sehr beeinträchtigen.

Dieser Vorbehalt ist jedoch inzwischen kaum mehr gerechtfertigt. An vielen Transplantationszentren stellte sich heraus, dass zumindest Lebern von Spendern zwischen fünfzig und sechzig Jahren denen von jüngeren Altersgruppen durchaus ebenbürtig sind. Auch der Erfolg noch älterer Lebern kann sich sehen lassen. Stammten sie von 60 bis 74 Jahre alten Spendern, arbeiteten nach einem Jahr noch 65 Prozent – verglichen mit 71 Prozent bei allen ersttransplantierten Lebern in Westeuropa.

Bei sehr jungen Patienten hat man ein ganz anderes Problem. Schätzungsweise eines von 10000 Neugeborenen kommt mit einer so schweren Lebererkrankung zur Welt, dass recht bald eine Transplantation unumgänglich wird. Mehr als die Hälfte dieser kleinen Patienten steht schon mit weniger als zwei Jahren auf der Warteliste. Früher starb jedes zweite dieser Kinder, weil kein geeignetes Organ eintraf. Darum kam man auf die Idee, die Lebern erwachsener Spender zu verkleinern. Dies erwies sich als erfolgreich. Weil aber das nicht benötigte Gewebe verworfen wurde, verschob sich das Problem des Organmangels lediglich von den Kindern auf die Erwachsenen.

Ende der 1980er Jahre kamen jedoch zwei Techniken auf, die mehr Kinder mit Transplantaten zu versorgen erlaubten, ohne die Ressourcen der älteren Patienten anzugreifen. Zum einen entnahm man einem lebenden Spender, meist einem Elternteil, den linken, kleineren Leberlappen. Das löste freilich eine Debatte über das ethische Problem solch umfangreicher Leberverkleinerungen bei Gesunden aus. In Japan, wo die Transplantation von Lebern Hirntoter bis vor wenigen Jahren verboten und damit die Lebendspende die einzige Option war, starben immerhin zwei von tausend Spendern, und jeder zehnte erkrankte im Zusammenhang mit der Operation. Trotzdem wurde auch in anderen Ländern dieses Verfahren zur wesentlichen Grundlage von Lebertransplantationen bei Kindern.

In der Bundesrepublik haben Lebendspenden eines Segments mittlerweile einen Anteil von 12,5 Prozent. Die Überlebensrate der kleinen Patienten wie auch die Funktionsrate der verpflanzten Organe ist gleich oder sogar besser als bei der Verwendung von Lebern hirntoter Spender. In Deutschland wird sogar erwogen, auch erwachsene Patienten mit dem kleinen Leberlappen eines lebenden Verwandten statt mit einer kompletten „Leichenleber“ zu versorgen.

Das andere Konzept, das Problem des Organmangels anzugehen, war die



DPA

Eine Transplantation beider Lungenflügel war bei diesem 13-Jährigen nötig, hier mit seiner Mutter und dem Oberarzt der Jenaer Klinik im Sommer 2000. Die Erbkrankheit Mukoviszidose hatte seine Lunge zerstört. Wegen des Organmangels versuchen Chirurgen inzwischen, einzelne Lungenlappen von lebenden Spendern zu verpflanzen.

Verteilung der Leber eines Hirntoten auf zwei Empfänger: Den größeren rechten Lappen sollte ein Erwachsener, den kleineren linken ein Kind bekommen. Zunächst gab es technische Komplikationen, und zu viele Transplantate nahmen ihre Funktion nicht wieder auf. Mit einer veränderten Operationstechnik, bei der die Chirurgen das Organ noch im Körper des toten Spenders teilten, erzielten sie dann jedoch hervorragende Ergebnisse, wahrscheinlich weil die beiden Transplantate wesentlich kürzere Zeit nicht durchblutet wurden. Die Überlebensrate derart versorgter Kinder und auch die Funktionsrate der Transplantate sind etwa die gleichen wie bei der Verpflanzung ganzer oder in ihrer Größe reduzierter Organe. Ähnliches gilt für die erwachsenen Empfänger des jeweils rechten Leberlappens.

Aus eins mach zwei

Die Strategie, aus dem Spenderorgan eines Hirntoten zwei Transplantate zu machen, ist derzeit jedoch nur bedingt anwendbar, weil unter den potenziellen Empfängern viel weniger Kinder sind als ältere Patienten. Japanische Chirurgen untersuchen deshalb, ob es genügen könnte, auch Erwachsenen nur den kleineren Leberlappen einzupflanzen. Ein weiterer Vorschlag ist, für zwei erwachsene Empfänger das Spenderorgan nicht der Anatomie folgend, sondern in zwei möglichst gleich große Hälften zu teilen. Sollte sich diese Technik bewähren, würden sich die Leberspenden von Hirntoten quasi verdoppeln lassen.

Eine Diskrepanz zwischen Verfügbarkeit und Bedarf besteht auch bei Lungen. Allein, statt zusammen mit einem Herz, wird das Organ erst neuerdings relativ oft transplantiert. In Deutschland hat sich die – nach wie vor relativ geringe – Zahl solcher Eingriffe im Laufe der vergangenen zehn Jahre immerhin von 62 auf 139 mehr als verdoppelt. Verbesserte Operationstechniken, vor allem beim Anschließen der Bronchien an die eigenen Atemwege des Empfängers, ermöglichen es nun, Patienten zu versorgen, für die zuvor allenfalls ein Kombinationstransplantat in Frage gekommen wäre.

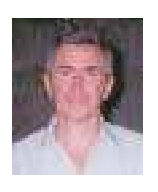
Wegen des Organmangels setzt man, falls möglich, einem Patienten nur einen fremden Lungenflügel ein und den zweiten einem anderen Empfänger. Dies geschieht beispielsweise bei einer „primären pulmonalen Hypertonie“. Der Austausch reduziert diesen gefährlich hohen Druck im Lungenkreislauf dann zwar deutlich. Aber weil 85 Prozent des Blutes über den neuen, guten Lungenflügel laufen, besteht das Risiko eines unter Umständen tödlichen Ödems, einer Wasseransammlung in der Lunge. Nach einer Transplantation beider Lungenflügel verteilt sich der Blutstrom gleichmäßiger. Obwohl der Eingriff komplizierter ist, sterben nur ein Zehntel, andernfalls ein Viertel der Empfänger dabei. Die Transplantate überstehen auch häufiger das erste Jahr: zu 77 Prozent gegenüber 66 Prozent.

Der Mangel an Organen hirntoter Spender hat Chirurgen auch veranlasst, Techniken zur Transplantation einzelner Lungenlappen von lebenden Spendern zu entwickeln. Die Mehrzahl der Empfänger sind jugendliche Patienten mit schwersten Lungenschäden durch Mukoviszidose, einer Erbkrankheit. Sie erhalten beidseitig Transplantate von zwei verschiedenen Spendern, meist engen Verwandten.

In den letzten Jahren hat sich die wissenschaftliche Diskussion wie auch die Vergabe von Forschungsmitteln stark auf neuartige Strategien des Organersatzes verlagert – wie die Xenotransplantation oder die Züchtung von Geweben und Organen außerhalb des Körpers. Diese Ansätze werden jedoch in den nächsten zehn Jahren noch nicht nennenswert zur Versorgung der Patienten beitragen können.

In der Zwischenzeit bedarf es vor allem einer intensiveren öffentlichen Information und Motivation zur Organspende. Schließlich dürfen auch die klinisch bereits bewährten Optionen keinesfalls vernachlässigt werden. Dank ihrer Weiterentwicklung gelang es, in den letzten Jahren die verfügbaren Organe schon wesentlich effizienter zu nutzen. Zweifellos lassen sich jedoch noch innovative methodische Konzepte entwickeln, die Selektionskriterien für Spenderorgane und Empfänger optimieren und die chirurgischen Techniken verbessern. ■





Guiseppe Remuzzi *(oben) ist Direktor der Abteilung für Immunologie und Klinik der Organverpflanzung an den Vereinigten Kliniken des Bergamo-Instituts für pharmakologische Forschung „Mario Negri“.* ***Norberto Perico*** *(Mitte) leitet das Labor zur Entwicklung von Pharmaka am Zentrum für die klinische Erforschung von seltenen Krankheiten „Aldo e Cele Daccò“.* ***Guiseppe Locatelli*** *leitet die Einheit für Kinder-Chirurgie sowie das Nieren-Transplantationszentrum der Vereinigten Kliniken von Bergamo.* ***Bruno Gridelli*** *(unten) ist Direktor der Abteilung klinische und experimentelle Pharmazie sowie des Leber-Transplantationszentrums.*

Die Daten für Deutschland wurden von der Redaktion ergänzt.

ARCHÄOLOGIE

Fischer in der Wüste

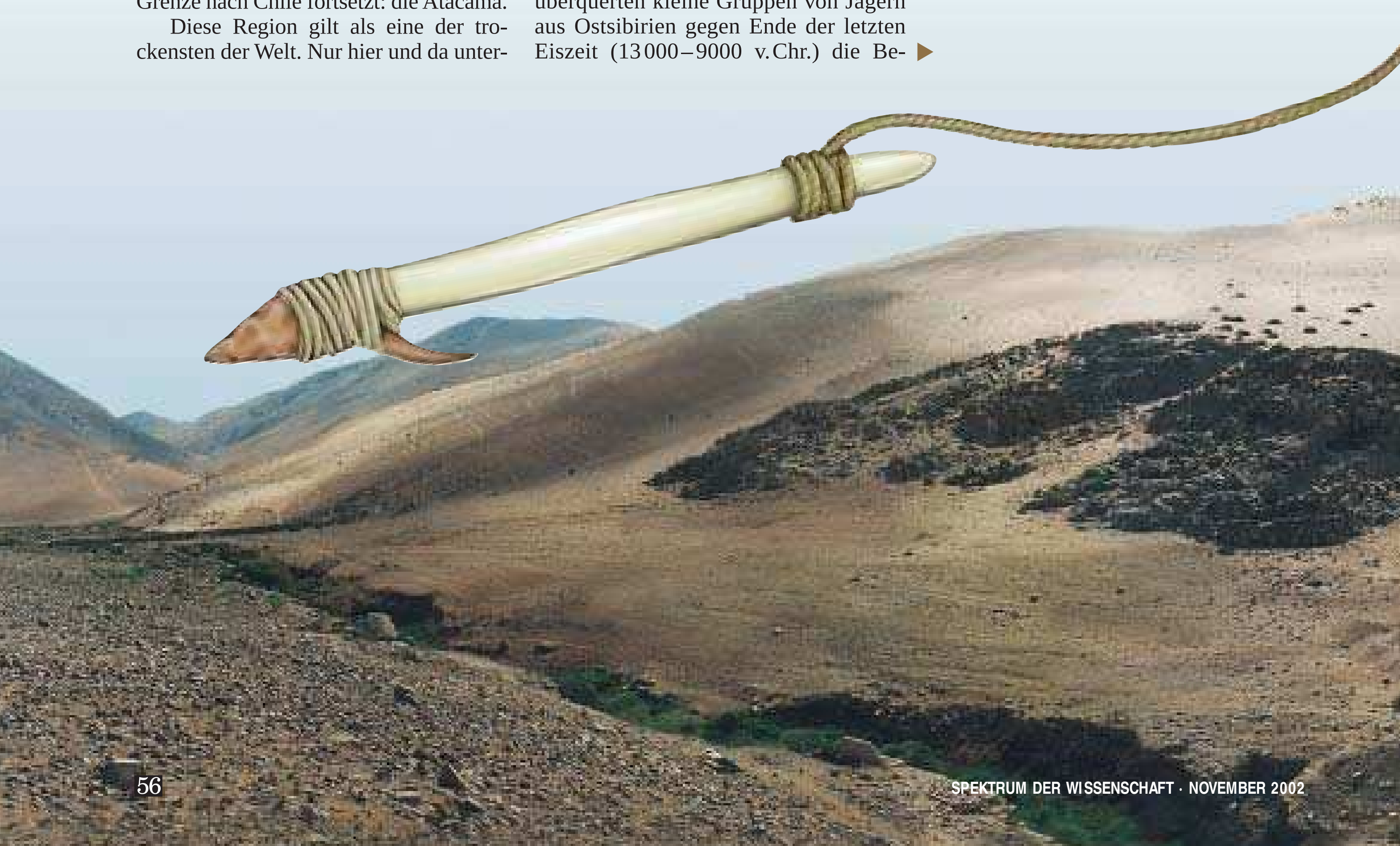
Schon vor 10 000 Jahren jagten und fischten Menschen an der peruanischen Küste. Doch kamen sie über Land dorthin oder auf dem Wasser?

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Südamerika, 18. Grad südlicher Breite – lange Strände und zerklüftete Vorgebirge dominieren die Küste des kalten Pazifiks an der Südgrenze Perus. Im Landesinneren beginnt dort eine Sand- und Felswüste, die sich als Streifen zwischen Anden und Meer über die Grenze nach Chile fortsetzt: die Atacama.

Diese Region gilt als eine der trockensten der Welt. Nur hier und da unterbrechen grüne Streifen die Wüstenlandschaft: Täler führen Wasser aus den Anden zum Meer; in diesen Oasen leben und wirtschaften die meisten Bewohner der Region. Doch wie weit reicht die Besiedlung in das Dunkel der Vergangenheit zurück? Wie gelangten die ersten Menschen nach Südamerika?

Der klassischen Hypothese nach überquerten kleine Gruppen von Jägern aus Ostsibirien gegen Ende der letzten Eiszeit (13 000 – 9000 v. Chr.) die Be-





Im Süden Perus, an der Küste des Pazifiks (oben), beginnt die Atacama-Wüste, die trockenste Wüste der Welt. Die spärlichen Wasserläufe, die hier und da diese felsige und sandige Weite unterbrechen, bringen gelegentlich schmale Streifen Grün hervor, so im Tal „Quebrada de los Burros“. Hier, zwei Kilometer von der Küste entfernt, haben französische Archäologen Überreste einer frühen menschlichen Siedlung ausgegraben (die quadratische Grube im Zentrum des Panoramabildes unten).

FOTOS: DANIELLE LAVALLÉE, ZEICHNUNGEN: DELPHINE BAILLY

ringstraße, die damals über dem Meeresspiegel lag. Sie folgten den großen Tierherden immer weiter nach Süden. Diese ersten Amerikaner besiedelten zunächst die Great Plains Nordamerikas. Später passierten sie die Landenge von Panama in Mittelamerika und wanderten entlang der Ostflanke der Anden bis nach Patagonien und Feuerland. Etwa 10000 bis 8000 v. Chr. habe dann ein besonders scharfer Kälteeinbruch im Anden-Hochland Menschen an die wüstenhafte Küste des Pazifiks gezwungen. Dort erlernten sie das Fischen. Doch wenn die Ressourcen am Meer knapp wurden, kehrten sie vorübergehend in höher gelegene Landstriche zurück.

Knut Fladmark von der kanadischen Simon-Fraser-Universität in Burnaby postulierte hingegen schon 1979, dass die ersten Siedler auch mit Booten die Küste entlang gefahren seien. Die Vorgebirge und Inseln Nordamerikas dürften nämlich dank des Ozeans mit seinen etwas milderen Temperaturen vom Eis weitgehend verschont geblieben sein.

Etwa fünfzig Kilometer nördlich der Grenze Perus zu Chile liegt ein etwa zehn Kilometer langes, enges Tal: die Quebrada de los Burros (zu Deutsch „Tal der Esel“, eine möglicherweise aus kolonialer Zeit stammende Bezeichnung). Zwischen Dünen und steilen felsigen Hängen fließt dort ganzjährig ein kleiner Wasserlauf – wegen des Regenmangels nahezu die einzige Wasserquelle. Nur während des Südwinters zwischen Juni und Oktober treiben Passatwinde dichte Nebel die Quebrada hinauf und spenden zusätzliche Feuchtigkeit. Weil die Berghänge dem Wind besonders ausgesetzt sind, gibt es dort so genannte *Lomas*, spanisch für Nebeloasen. Hier gedeihen charakteristische Pflanzengesellschaften, geprägt von Kakteen und anderen Sukkulenten, Gräsern und Zwiebelpflanzen, von denen einige essbar sind. Zudem

Klima und Kulturentwicklung

Segenreiches Christkind

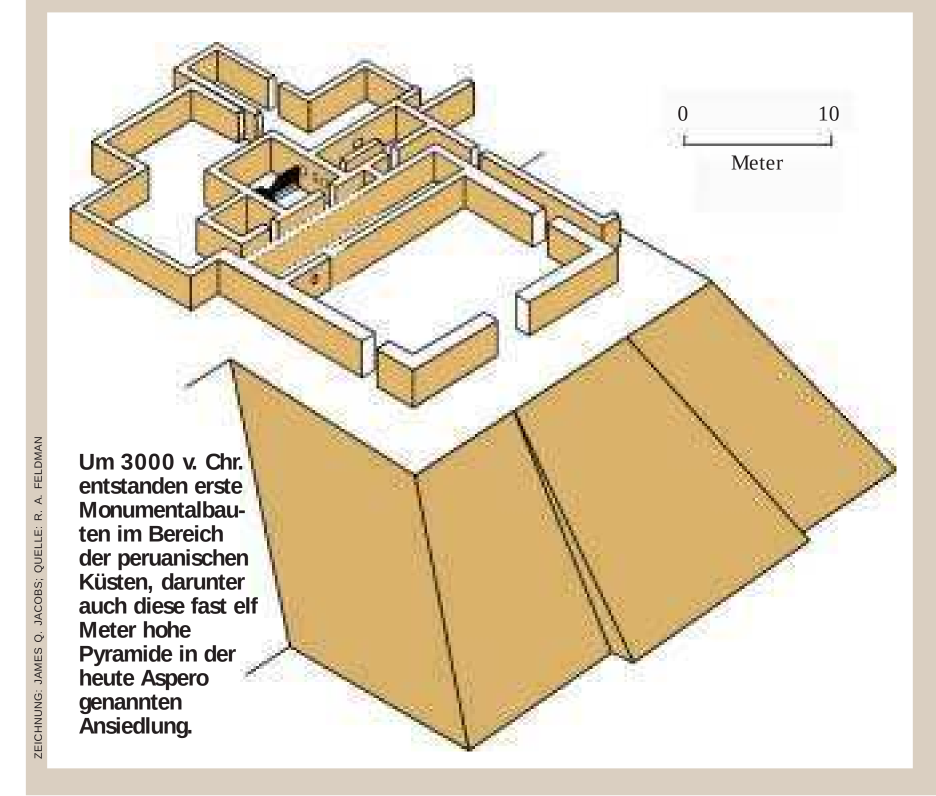
Eine natürliche Umwälzpumpe bestimmt das Klima an den Küsten des Pazifiks: Im Winter treiben Passatwinde das im Sommer erwärmte Oberflächenwasser gen Norden und Westen, kaltes Tiefenwasser kann nun aufsteigen. Doch alle drei bis sieben Jahren wird dieser Kreislauf unterbrochen, und das hat weit reichende Folgen: Kälte liebende Fische und Mollusken sterben, heftige Regenfälle verursachen Erdrutsche. Auf der anderen Seite des Pazifiks wiederum fehlt die Feuchtigkeit, und Australien wird von Dürren und Buschfeuern heimgesucht.

Diese Klimaanomalie wird El Niño genannt, da sie zuerst an Weihnachten in Peru beobachtet worden ist. Seitdem beschäftigt sie Wissenschaftler aller Fachrichtungen. Zentrale Fragen lauten: Wie lange gibt es das Phänomen schon, und hat es die Entwicklung der Kulturen Südamerikas beeinflusst?

Der Geologe Pierre Usselmann vom Maison de la Géographie in Montpellier und der Geochemiker Michel Fontugne vom CNRS (Centre national de la recherche scientifique) halten die zwei durch Erdrutsche verursachten Schichten im Bodenhorizont der Quebrada de los Burros für eine Folge von El Niños – wie in heutiger Zeit hätte es nur dann ausreichende Regenfälle in der Region gegeben. Artefakte in den Siedlungsschichten zwischen den Schlammlagen erlaubten eine grobe Datierung: Der ältere Erdrutsch muss demnach vor 8000 v. Chr., der jüngere nach 2500 v. Chr. abgegangen sein. In den dazwischenliegenden Jahrtausenden scheint sich das „Christkind“ nicht bemerkbar gemacht zu haben. Das Klima war warm und feucht, begünstigte also die Ansiedlung der Fischer im Tal; auch gab es offene Wasserstellen und viel Vegetation als Nahrung für jagbares Wild.

Muschelreste verschiedener Grabungsorte entlang der Küste bestätigen diesen Befund. Die gefundenen Arten zeigen nach Ansicht von Daniel H. Sandweiss von der Universität Maine in Orono Folgendes: Zwischen 7050 und 3850 v. Chr. war das Klima warm und ziemlich stabil, das El-Niño-Phänomen äußerst selten. Das änderte sich in der Folgezeit, und bis etwa 850 v. Chr. trat die Klimaanomalie häufiger, wenn auch in größeren zeitlichen Abständen auf.

El Niño in Maßen brachte Südamerika nun Segen: Tempel entstanden, die Landwirtschaft entwickelte sich. Denn der Regen ermöglichte den Anbau von Feldfrüchten wie Kürbis, Bohne und Avocado im Landesinneren. Einige Archäologen glauben an einen regen Handel zwischen Fischern und Bauern um 3000 v. Chr. Erst nach 850 v. Chr. stellten sich die kurzen Oszillationen nach heutigem Muster ein und verschlechterten die Lebensbedingungen wieder, der Bau monumentaler Tempel verebbte.



Um 3000 v. Chr. entstanden erste Monumentalbauten im Bereich der peruanischen Küsten, darunter auch diese fast elf Meter hohe Pyramide in der heute Aspero genannten Ansiedlung.

ZEICHNUNG: JAMES Q. JACOBS; QUELLE: R. A. FELDMAN

bieten die *Lomas* allerlei Getier Lebensraum, darunter auch kleinen Säugetieren, selbst Guanakos und Hirschen.

Vor acht Jahren unternahmen die Archäologinnen Danielle Lavallée und Michèle Julien vom Laboratoire d'archéologie des Amériques des französischen Centre national de la recherche scientifique (CNRS) in Paris eine erste Erkundung. Ungefähr zwei Kilometer von der heutigen Küstenlinie entfernt, in 150 bis 200 Meter Höhe, entdeckten sie an den Ufern des Bachs Geländeaufschlüsse, die das Wasser einst freigelegt hatte. Die oberste und die unterste der sichtbaren Schichten stammen vermutlich von Erdrutschen, die bei früheren El Niños – Klimaanomalien mit erheblichen Regenfällen – abgingen (siehe Kasten links).

Zwischen ihnen fanden die Archäologinnen Schichten, die Seemuscheln enthielten, unterbrochen von torfhaltigen Lagen. Eine solche Abfolge zeugt davon, dass jenen küstenfernen Ort immer wieder Menschen bewohnt haben. Die torfigen Schichten entstanden vermutlich während feuchter Perioden, als ein Sumpf oder kleiner See den Boden des Tals bedeckte. Einige Proben wurden mit der C14-Methode auf 8000 v. Chr. datiert, also in den Grenzbereich der klassischen Theorie zur Küstenbesiedlung via Anden.

Ausgefeilte Jagdmethoden

Ein Jahr später begannen Lavallée und Julien etwa in der Mitte des Tals einen flacheren Bereich Siedlungshorizont für Siedlungshorizont großflächig abzutragen. In sechs Grabungskampagnen entdeckten sie acht aufeinander folgende Besiedlungsniveaus in einer etwa zwei Meter starken Bodenschicht. Um 6500 und 4000 v. Chr. dürfte den Funden zufolge die höchste Bevölkerungsdichte dort geherrscht haben. Insgesamt zeigte ihre Analyse: Über die Jahrtausende hinweg war der Ort mal mehr, mal weniger dicht besiedelt, niemals aber für längere Zeit verlassen.

Reste tierischer Nahrung und Werkzeuge stammen aus einem Flecken von etwa 25 bis 30 Meter Durchmesser. Dort, wo sie besonders dicht lagen, dürfte der Wohnbereich gewesen sein. Er befand sich am Rand des sandigen Hangs, auf einer leichten Terrasse am Fuß einiger Felsen. Haben die Menschen dort Schutz gegen den Sand gesucht, den der Wind das Tal hinauftrieb?

In den alten Siedlungsniveaus entdeckten die Archäologinnen wenige flache Herdstellen, umgeben von Muschelschalen und Fischgräten. In den beiden genannten Phasen stärkster Nutzung ▶



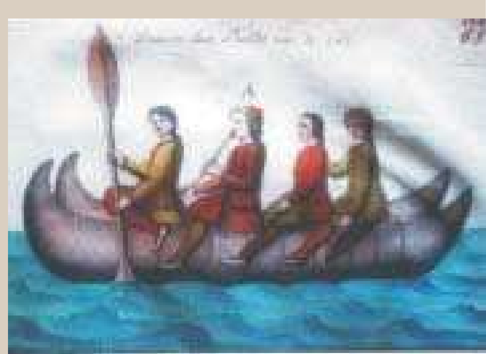


FOTOS: DANIELLE LAVALLÉE

Muschelschalen (oberes Bild) fernab der Küste lassen nur einen Schluss zu: Die Bewohner der prähistorischen Siedlung lebten auch vom Meer. Mitunter haben die Archäologinnen kreisbogenförmige Streifen aus solchen Schalen ausgegraben (unteres Bild). Vermutlich standen dort leichte Schutzhütten oder Windschilde.







Die Bewohner der „Quebrada de los Burros“ fuhren zur See und jagten wahrscheinlich von Booten aus. Diese bestanden vielleicht aus Bündeln von Binsen, wie sie peruanische Fischer noch heute benutzen (links und oben), oder aus Bälgen von Ohrenrobben, die zusammengenäht und aufgeblasen wurden – im 18. Jahrhundert waren solche Boote an der chilenischen Nordküste in Gebrauch (unten).

ABBILDUNGEN: SEVICE HISTORIQUE DE MARINE

war der Wohnplatz deutlicher strukturiert. So lagen Muschelschalen in zwei bis drei Meter durchmessenden Kreisbögen; darin wiederum gab es oft eine Herdstelle. Lavallée und Julien vermuten, dass an dieser Stelle halb offene Hütten oder Geflechte aus Zweigen den Wind abhielten.

Den Grundstock der Ernährung lieferte den Funden zufolge das Meer. In Höhe der dichtesten Besiedlung fanden die Franzosen Knochenreste von 15 bis 40 Tieren je Quadratmeter. Einige große „Meerraben“ (eine Art großer Seebarsch) maßen zu Lebzeiten wohl mehr als einen Meter in der Länge und wogen fast 30 Kilogramm. Auch Rochen und Haie von bis zu 1,40 Meter Länge waren vertreten. Des Weiteren standen Muscheln, Taschenkrebse und Seeigel auf der Speisekarte, aber auch Meeressäuger, Vögel und Lurche, Guanakos und Nagetiere. Zumindest während des Südwinters, wenn die Nebeloasen wie heute noch besonders üppig bewachsen waren, jagten die Talbewohner auch an Land.

Offensichtlich waren sie Fischer und Jäger; sie beherrschten verschiedene Fangtechniken: Angeln, das Harpunieren von Haien und das Fischen von Sardinen mit feinmaschigen Netzen. Schalentiere sammelten sie an den Sandstränden, aber auch auf felsigem Grund in der Gezeitenzone; andere holten sie aus einer Tiefe von vier bis fünf Metern. Manche der identifizierten Fischarten lebten in der unmittelbaren Nähe des Strandes, andere auf hoher See. Daraus schlossen die Archäologinnen, dass diese Menschen schon vor Tausenden von Jahren in der Lage waren, an der Küste zu angeln, aber auch in brandungstauglichen Booten auf das offene Meer hinauszufahren (siehe Bilder links). Ihre Besitzer haben die Boote wahrscheinlich am Strand zurückgelassen, statt sie kilometerweit das Tal hinaufzuschleppen. Waren es kleine Flöße aus Binsenbündeln, wie sie Fischer im Norden Perus noch heute nutzen? Oder leichte Boote aus zugenähten und mit Fett abgedichteten Robbenbälgen, die im 18. Jahrhundert entlang der chilenischen Küste in Gebrauch waren?

Die frühen Siedler der Quebrada de los Burros haben auch Zwiebeln, Knollen und wildes Getreide gesammelt, die Körner auf Mahlsteinen zerrieben und zubereitet. Als Werkzeuge nutzten sie Faustkeile, aus Knochen und Muschelschalen fertigten sie geschickt Harpunenspitzen und Angelhaken (siehe Bilder rechts).

Archaische Rituale

Diese Menschen wussten in einer unwirtlichen Gegend zu überleben. Und sie hatten vermutlich eine Vorstellung vom Leben nach dem Tode. Darauf deutet jedenfalls ein Begräbnisplatz in einer mehr als zwölf Meter tiefen Rinne, unweit der Grabungsstelle in südöstlicher Richtung gelegen. Schon 1995 entdeckten die CNRS-Archäologinnen Teile menschlicher Skelette an den Seitenwänden des Grabens.

Der Wind legt dort immer wieder Knochen frei, die in die Rinne hinabfallen. Anscheinend hatte man die Leichen in ausgestreckter oder gebeugter Position bestattet, einige in Mehrfachgräbern. Große horizontale Steinblöcke schützten die Grabanordnung. Die Grabstätten wurden zwischen 8500 und 8000 v. Chr. angelegt – sie gehörten wohl von Anfang an zur Siedlung. Die Schädel der Toten hatte man mit einem schwärzlichen, schimmernden Belag überzogen. Eine Analyse im Labor der Musées de France ergab, dass es sich dabei um eine Mischung aus Manganoxid und feinem Ton handelt. Das erinnert an Begräbnisrituale eines anderen Volkes von Fischern und Sammlern, der Chinchorros. Diese leb- ▶

Literaturhinweise

Amplifying Importance of New Research in Peru. Von Daniel H. Sandweiss und Michael E. Moseley in: Science, Bd. 294, S. 1651, 23. November 2001.

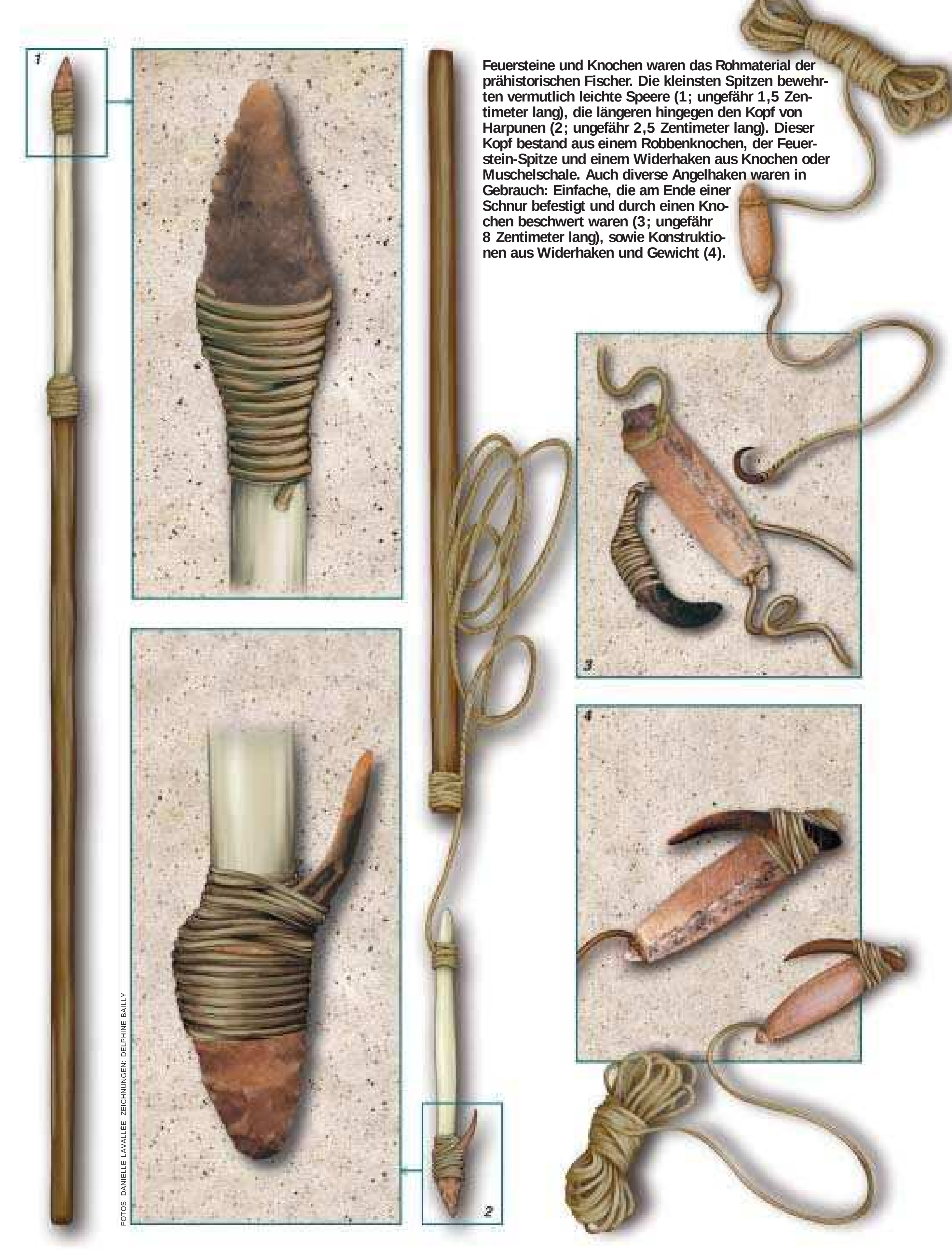
Variation in Holocene El Niño frequencies: Climate records and cultural consequences in ancient Peru. Von Daniel H. Sandweiss et al., Juli 2001, abzurufen unter iceage.umeqs.maine.edu/pdfs/sandweiss-etal01.pdf

Archaic Fishing at Quebrada de los Burros, southern coast of Peru. Reconstruction of fish size using otoliths. Von Philippe Béarez in: Archaeofauna, Bd. 9, S. 29, Madrid, 2000.

Evidence of less dryer Periods in the Coastal Southern Peru during the Holocene. Von M. Fontugne et al. in: Quaternary Research, Bd. 52, S. 171, 1999.

Transitions in the Mid-Holocene. Von Daniel H. Sandweiss et al. in: Science, Bd. 283, S. 499, 22. Januar 1999.

Promesse d'Amérique? La préhistoire de l'Amérique du Sud. Von Danielle Lavallée. Hachette, 1995.



Feuersteine und Knochen waren das Rohmaterial der prähistorischen Fischer. Die kleinsten Spitzen bewehrten vermutlich leichte Speere (1; ungefähr 1,5 Zentimeter lang), die längeren hingegen den Kopf von Harpunen (2; ungefähr 2,5 Zentimeter lang). Dieser Kopf bestand aus einem Robbenknochen, der Feuerstein-Spitze und einem Widerhaken aus Knochen oder Muschelschale. Auch diverse Angelhaken waren in Gebrauch: Einfache, die am Ende einer Schnur befestigt und durch einen Knochen beschwert waren (3; ungefähr 8 Zentimeter lang), sowie Konstruktionen aus Widerhaken und Gewicht (4).

FOTOS: DANIELLE LAVALLÉE, ZEICHNUNGEN: DELPHINE BAILLY

In der Nähe der Ausgrabungen, am Hang einer tiefen Rinne, legt der Wind immer wieder Gräber frei, die spätestens von etwa 8500 v. Chr. stammen. Man hatte die Toten in ausgestreckter oder gebeugter Haltung hineingelegt, zuvor aber die Schädel mit einer Mischung aus Manganoxid und Ton eingerieben.

FOTOS: DANIELLE LAVALLÉE

ten später, zwischen 7000 und 4000 v. Chr., an der Küste Nordchiles. Lavallée und Julien sehen kulturelle Gemeinsamkeiten beider Völker – ob sie miteinander verwandt waren, lässt sich nicht sagen.

Heute trennen etwa zwei Kilometer Luftlinie die Reste der Siedlung von der Küste. Bei ihrer Gründung dürfte sie aber noch weiter landeinwärts gelegen haben, denn damals waren die großen Gletscher noch nicht vollständig geschmolzen und der Meeresspiegel lag deshalb etwa dreißig Meter tiefer. Um die Küste zu erreichen, mussten die Fischer also etwa 180 Höhenmeter absteigen und später samt der schweren Beute wieder erklimmen. Für diesen Aufwand gibt es nur eine plausible Erklärung: Allein in der Quebrada fanden sie ausreichend Süßwasser und waren vor Winden und Sand geschützt.

Nach der klassischen Hypothese betraten die ersten Gruppen von Menschen etwa 12000 v. Chr. amerikanischen Boden. Die Quebrada de los Burros, 16000 Kilometer weiter südlich gelegen, wurde jedoch den Ergebnissen des französischen Teams zufolge schon 2000 Jahre später besiedelt – für das langsame Vordringen der Siedler über Land ein eher kurzer Zeitraum. Dieser Befund deckt sich mit einigen anderen aus Südamerika wie etwa bei den Ausgrabungen in Monte Verde (Chile): Dieser Ort liegt noch einmal 4000 Kilometer weiter Richtung Süden, ist aber ein Jahrtausend jünger (Spektrum der Wissenschaft 02/2001, S. 42). Ein Gedanke liegt nahe: Per Boot hätten die Menschen zwischen den Siedlungsplätzen größere Strecken zurücklegen können.

Gegen eine Besiedlung vom Land aus spricht auch, dass zur Zeit der größten Bevölkerungsdichte der Quebrada de los Burros auch die Hochtäler der Anden stark bevölkert waren. Einen Exodus auf Grund von Klimakatastrophen Richtung Küste hat es nach Meinung von Danielle Lavallée und Michèle Julien nicht gegeben. Es wäre nach ihrer Ansicht auch kaum glaubhaft, dass Großwildjäger das Meer von Anfang an derart perfekt zu nutzen verstanden – ihnen hätten Technologie und Erfahrung gefehlt.

Vergleichbare Fundstätten entlang der Pazifik-Küste stützen die Schlussfolgerungen der Wissenschaftlerinnen. An der Südküste Ecuadors fanden Forscher die Überreste sehr großer Fische, die man nur mit Booten fangen konnte; die betreffende Schicht am Grabungsort Las Vegas-80 wurde auf 8800 bis 8100 v. Chr. datiert. Noch älter sind Siedlungsreste weiter im Norden, vor der südkalifornischen Küste auf den Inseln Santa Rosa und San Miguel. Auch wenn sie in der fraglichen Epoche näher zum Festland lagen als heute, hatten die Inselbewohner offensichtlich solide seemännische Praxis. Schon die unmittelbare Umgebung des Tales der Esel bietet Anhaltspunkte: Etwa 150 Kilometer weiter nördlich liegt die Quebrada Tacahuay, noch einmal 200 Kilometer weiter die Quebrada Jaguay. Dort lebten ebenfalls Fischer, allerdings schon um 10000 v. Chr. Archäologen fanden verhältnismäßig viele Überreste kleiner Fische, die auf eine weit entwickelte Netz-Technik schließen lassen. Auch wenn Knut Fladmarks Theorie von der Wanderung entlang der Küsten mehr und mehr Anhänger findet, zeigen die Artefakte, dass Entweder-oder nicht die richtige Fragestellung sein mag: Obsidian, der in der Quebrada Jaguay gefunden wurde, dürfte aus einem Gebiet in den Anden stammen. Hatten die Fischer ihn im Rahmen von Handelsbeziehungen erstanden oder doch von dort mitgebracht? ■



Klaus-Dieter Linsmeier *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. Der Beitrag basiert auf „Les pêcheurs préhistoriques du Pérou“ von Danielle Lavallée und Michèle Julien in Pour La Science, 11/2001, S. 68.*





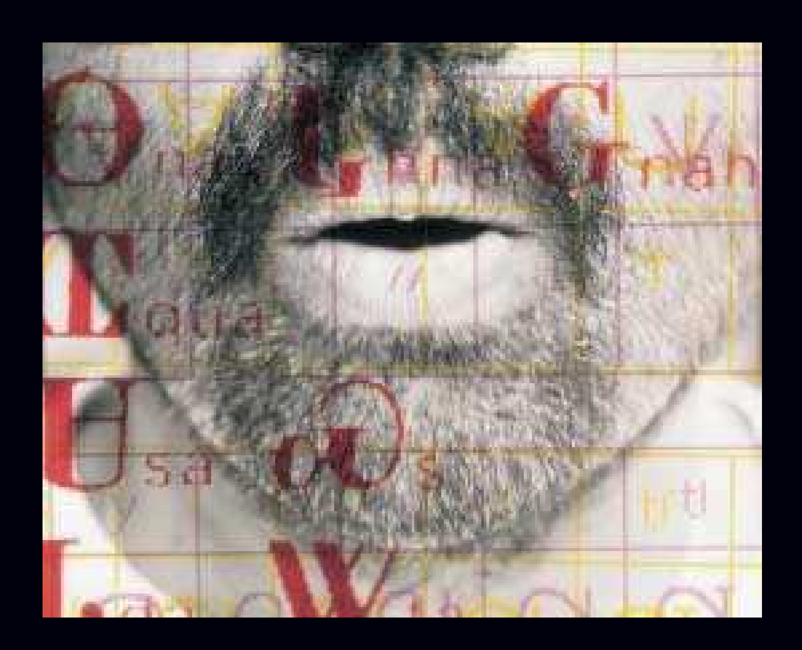




ABBILDUNGEN: IRAIDA ICAZA

Das große Sprachensterben

Seit Jahren ist Sprachforschern bewusst, dass weltweit tausende Sprachen vom Aussterben bedroht sind. Doch erst seit kurzem entwickeln sie verstärkt Anstrengungen, um den kostbaren Schatz zu retten.





Wenn wir nicht bald etwas unternehmen, wird die Linguistik als eine Wissenschaft in die Geschichte eingehen, die gleichgültig zusah, wie ihr Gegenstand zu 90 Prozent verloren ging.

Michael Krauss, „The World's Languages in Crisis" (1992)

Von W. Wayt Gibbs

Vor zehn Jahren schockierte Michael Krauss seine Kollegen in der Sprachwissenschaft mit einer Vorhersage: Innerhalb dieses Jahrhunderts werde die Hälfte der 6000 auf der Welt gesprochenen Sprachen verschwunden sein. Im Jahr 1972 hatte Krauss, damals noch an der Alaska Universität, selbst das *Alaska Native Languages Center* gegründet. Sein Zweck: die verbleibenden zwanzig Eingeborenen-Sprachen dieses Staates der Nachwelt zu erhalten.

In lediglich zwei dieser Sprachen wurden noch Kinder unterrichtet. Andere existierten nur in der Erinnerung weniger betagter Sprecher, der Rest war im Begriff auszusterben. Die Situation in Alas- ▶

ka sei beispielhaft für einen globalen Trend, warnte Krauss damals. Neun Zehntel aller Sprachen der Menschheit gingen vermutlich für immer verloren, wenn nicht Wissenschaftler und Regierungsverantwortliche weltweit Anstrengungen gegen diese Entwicklung in die Wege leiteten.

Krauss' Voraussage war seinerzeit noch ein eher wenig begründeter Verdacht. Jedoch lieferten bald auch andere anerkannte Sprachforscher ähnlich düstere Prognosen. Kenneth L. Hale vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) berichtete, dass acht Sprachen, über die er Feldstudien betrieben hatte, inzwischen von niemandem mehr gesprochen würden. Nach einer australischen Studie aus dem Jahr 1990 waren von neunzig Aborigines-Sprachen siebzig nicht mehr in allen Altersstufen gebräuchlich. Das Gleiche gelte für die 175 heute noch in den USA geläufigen Indianersprachen. Von diesen seien nur mehr zwanzig generell im Gebrauch, warnte Krauss 1992.

Auf den ersten Blick mag die Angleichung der Sprachen wie eine positive Entwicklung scheinen, mindert sie doch Spannungen zwischen Ländern oder Menschengruppen und erleichtert den Welthandel. Solche Vorzüge erkennen Linguisten durchaus an. Sie wissen auch, dass Sprecher von Sprachminderheiten (oft unbewusst) dazu neigen, einer dominierenden Sprache ihrer Umgebung den Vorrang zu geben – zumeist in der Hoffnung auf gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Aufstieg.

Dennoch beklagen die Wissenschaftler den Verlust von Minderheitensprachen. Dies ist vor allem im wissenschaftlichen Selbstinteresse begründet: Einige fundamentale, teilweise ungeklärte Fragen der Linguistik betreffen die Grenzen der menschlichen Sprache. Forscher wollen auch verstehen, welche Aspekte von Grammatik und Vokabular universal und daher womöglich in jedem menschlichen Gehirn fest verankert sind. Andere Linguisten untersuchen Bevölkerungsmigrationen, Handelswege oder Machtbeziehungen, indem sie Wortanleihen zwischen ansonsten nichtverwandten Sprachen vergleichen. Für all diese Fälle gilt: Je mehr Sprachbeispiele, desto besser die Resultate.

Statt Geld nur leere Blicke

James Matisoff gilt als Spezialist für asiatische Sprachminderheiten an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Für ihn liegt der Wert einer Sprache eher im Menschlichen: „Sprache ist das wichtigste Merkmal einer Kultur oder Gemeinschaft. Stirbt sie aus, geht damit auch das Wissen um ihre Kultur und ein einzigartiges Bild der Welt verloren."

Im Jahre 1996 half Luisa Maffi, die Arbeitsgruppe *Terralingua* zu gründen. Damit wollte die Sprachwissenschaftlerin und Autorin des Buches „On Biocultural Diversity" („Über biokulturelle Vielfalt") auf die Verbindung zwischen sprachlicher und biologischer Vielfalt hinweisen, wie sie oft in ein und demselben Land konzentriert anzutreffen ist. Eine andere internationale Gruppe erarbeitete 1996 eine ehrgeizige „Allgemeine Erklärung von Sprachenrechten". Der Antrag bei der Unesco wartet immer noch auf Antwort.

Trotz ständig geäußerter Klagen seitens der Sprachforscher ist in den letzten zehn Jahren deprimierend wenig für den Erhalt aussterbender Sprachen geschehen. „Eigentlich würde man eine konzertierte Aktion gegen diese traurigen Zustände erwarten", moniert Sarah G. Thomason, Linguistin an der Universität von Michigan in Ann Arbor. „Wenigstens den Versuch, diejenigen Sprachen auszusuchen, die gerettet und dokumentiert werden sollen, bevor sie dahinschwinden. Aber in meiner Branche hat man bisher nichts unternommen. Gefährdete Sprachen zu studieren, kam erst in den letzten Jahren auf."

Douglas H. Whalen von der Yale University an der amerikanischen Ostküste erinnert an die Zeit vor sechs Jahren: „Wenn ich bei Sprachforschern nachfragte, wo man dafür Gelder bekäme, erntete ich nur leere Blicke." Daraufhin gründete Whalen mit einigen anderen Linguisten einen „Fonds für gefährdete Sprachen", der aber bis 2001 lediglich Forschungsgelder in Höhe von 80000 Dollar aufbrachte. „Ich glaube nicht, dass sich die Situation in den letzten Jahren geändert hat", meint dazu der britische Linguist Nicholas Ostler. Steven Bird von der Pennsylvania Universität befürchtet, dass angesichts der geringen Forschungsmittel „jeder, der über gefährdete Sprachen forschen will, sich von einer lukrativen Karriere verabschieden muss."

Vielleicht wird sich die Situation aber bald ändern. Die Volkswagen-Stiftung in Hannover zum Beispiel fördert das Thema seit 1999, bis heute mit über fünf Millionen Euro. Mit diesen Mitteln konnte in den Niederlanden, am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik, ein multimediales Archiv für Aufnahmen, Grammatiken, Wörterbücher und andere Datenträger gefährdeter Sprachen eingerichtet werden. Um das Archiv zu füllen, engagierte die VW-Stiftung Sprachforscher für Feldstudien. Sie sollen etwa die Sprachen Aweti (an die hundert Sprecher in Brasilien), Ega (etwa dreihundert Sprecher an der Elfenbeinküste) und Waima'a (einige hundert Sprecher in Osttimor) dokumentieren. Diese sowie ein Dutzend anderer Sprachen werden vermutlich dieses Jahrhundert nicht überleben.

Auch die Ford-Stiftung hat sich der Sache angenommen. Dank ihrer Unterstützung konnte ein Lehrer-Schüler-Programm, das Leanne Hinton 1992 in Berkeley mit anderen Sprachwissenschaftlern ins Leben gerufen hatte, wiederbelebt werden. Es war aus der Sorge um die etwa fünfzig Eingeborenensprachen in Kalifornien entstanden, deren Sprecherzahl bereits rapide zurückging. Das Programm beinhaltet, dass Sprecher, welche die Sprache noch fließend beherrschen, für 3000 Dollar ein jüngeres Familienmitglied (das ebenfalls ein Entgelt erhält) in ihrer Eingeborenensprache insgesamt 360 Stunden für die Dauer von sechs Monaten unterrichten. Bisher haben 75 solcher Gruppen das Programm zur Rettung von insgesamt zwanzig Sprachen durchlaufen.

„Es wäre jedoch verfrüht, hier von einer Sprachwiederbelebung zu sprechen", dämpft Hinton die Erwartungen. „In Kalifornien wird die Sterberate be- ▶

IN KÜRZE

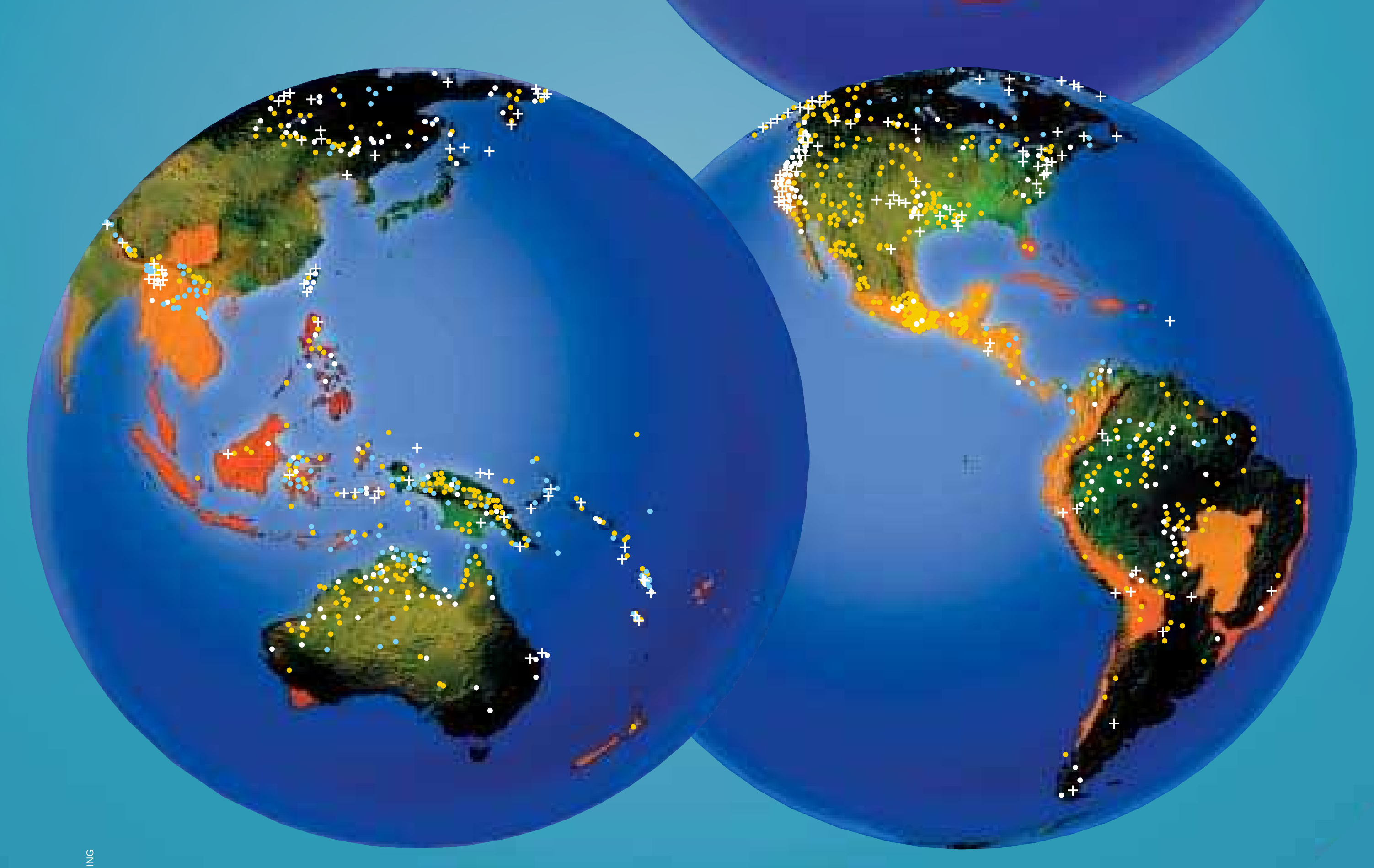
➤ Die neueste, 14. Ausgabe des Ethnologue-Lexikons aus dem Jahr 2000 (www.ethnologue.com) führt weltweit 6809 lebende Sprachen auf, von denen 417 als fast ausgestorben gelten. Übereinstimmend erwarten die Experten, dass bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als die Hälfte dieser Sprachen verschwunden sein werden.

➤ Nur wenige der Sprachen sind gut genug dokumentiert, um Grundfragen der Linguistik untersuchen zu können: Universalität der Grammatik, Sprachevolution sowie Themen der Migration und Anthropologie.

➤ Erst seit kurzem bemühen sich Linguisten in aller Welt, aussterbende Sprachen vor dem Verschwinden zu retten. Die Volkswagenstiftung beispielsweise hat diesem Programm seit 1999 bisher 5,3 Millionen Euro zur Verfügung gestellt (www.mpi.nl/DOBES). Der britische *Lisbet Rausing Charitable Fund* hat für die nächsten zehn Jahre sogar 30 Millionen Euro gestiftet.

Bedrohte Vielfalt: Sprachen und Lebensformen

Biologische und linguistische Vielfalt scheinen weltweit oft in den gleichen Ländern am stärksten ausgeprägt zu sein. Kein Wunder, dass Forscher dies nicht für einen Zufall halten. Die Weltkarte zeigt biologische „Hot Spots“, mit der höchsten Dichte an einheimischen Pflanzen und Wirbeltieren (orange-rote Flächen), außerdem die Orte der bedrohten oder kürzlich ausgestorbenen Sprachen (Punkte und Kreuze). Dieses Gesamtbild ist komplex: Falls eine Beziehung zwischen Biodiversität und Sprachenvielfalt existiert, dann ist sie jedenfalls nicht offensichtlich.



Einheimische Pflanzen- und Wirbeltierarten pro hundert Quadratkilometer

1,2 — 81,1

Bedrohte Sprachen
+ kürzlich ausgestorben
● im Aussterben begriffen
● gefährdet
● schlechte Prognosen

GRAFIK: JOYCE PENDOLA
QUELLEN: ATLAS OF THE WORLD'S LANGUAGES IN DANGER OF DISAPPEARING (2. AUFLAGE, UNESCO, 2001)
NORMAN MYERS ET AL. „BIODIVERSITY HOTSPOTS FOR CONSERVATION PRIORITIES“ (NATURE, BD. 403, S. 853, 24.2.2000)

Datenbank für Sprachen

Ein neuer Rosette-Stein im Computer?

Die Sprache der altägyptischen Hieroglyphen galt so lange verschollen, bis Napoleons Truppen 1799 im Dorf Rosette im Nildelta auf ein tausend Jahre altes Stück Basalt-Gestein stießen. In die schwarze Fläche des 114 x 72 x 28 Zentimeter großen Artefakts waren drei Versionen ein und desselben Textes eingemeißelt: in Demotisch, in Griechisch und in ägyptischen Hieroglyphen. Mit diesem Übersetzungsschlüssel konnten die Forscher den Blick auf eine jahrtausendelang verborgene Geschichte richten.

Zwar war der Rosette-Stein nur durch Zufall erhalten geblieben, doch regte er eine eingeschworene Gruppe von Ingenieuren und Wissenschaftlern dazu an, ein modernes Artefakt zu schaffen, das Grundkenntnisse der Sprachen der Welt für Anthropologen auch der fernen Zukunft erhalten sollte. Jim Mason, der das Rosette-Projekt für die Long Now Foundation in San Francisco, Kalifornien (im Web unter www.longnow.org), leitet, kündigte die Fertigstellung des ersten „Steins" in Kürze an.

Wie das Original wird auch der moderne Rosette-Stein parallele Texte enthalten (das erste Kapitel der Genesis). Und für den Fall, dass eine Sprache über keine Schriftform verfügt, wird sie in Lautschrift konserviert. Das Konzept sieht vor, weit größere Datenmengen bereitzustellen als auf dem historischen Vorbild: Für jede der tausend Sprachen sollen 27 Seiten Text neben einer in Englisch gehaltenen Beschreibung der jeweiligen Sprache stehen. Die Seiten werden als mikroskopisch kleine Bilder auf eine runde Nickelscheibe mit knapp acht Zentimeter Durchmesser geprägt. Eine Landkarte in der Mitte dient als Ortsangabe. Um diesen Mikrodruck lesen zu können, genügt ein Mikroskop mit tausendfacher Vergrößerung.

Masons Team plant eine Massenproduktion der Scheiben, die, verpackt in Stahlbehältern, vor Beschädigung geschützt werden. Dann sollen sie über den gesamten Globus verteilt werden. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass der Nachwelt wenigstens eine Scheibe erhalten bleibt. Der wichtigste Teil des Rosette-Projekts wird aber weniger diese analoge Scheibe sein, sondern eine digitale Datenbank von Wortlisten für 4000–5000 Sprachen, welche die Gruppe demnächst fertig stellen will. „Digitale Wortlisten sind bereits für 2000 Sprachen erstellt", erläutert Mason, „die Hälfte davon steht schon im Internet. Die Wissenschaftler des Santa-Fe-Instituts, spezialisiert auf interdisziplinäre Projekte, warten bereits auf diese Daten, um ihre Analysen zu Sprachwandel und Migration von Bevölkerungsgruppen zu verbessern."

Um Lücken in der Datenbank zu füllen, stellte das Rosette-Team vergangenes Jahr eine Website (www.rosettaproject.org) ins Internet. Erforscher und Sprecher von Minderheitensprachen können dorthin Wortlisten, Tonaufnahmen und Grammatiken liefern oder vorhandene Dokumente überprüfen. Bis Juni haben 648 Freiwillige (darunter nach Masons Schätzung ein Viertel Sprachwissenschaftler) Material geliefert. Theoretisch können so die Sprecher von Sprachen, die im Aussterben begriffen sind, ihr Wissen zum Nutzen künftiger Generationen beisteuern. Praktisch gesehen sind derartige Sprecher leider zumeist alt, arm und in Computerdingen unerfahren. Kaum einer dieser letzten Zeugen ihrer Art verfügt über einen Zugang zum Internet.

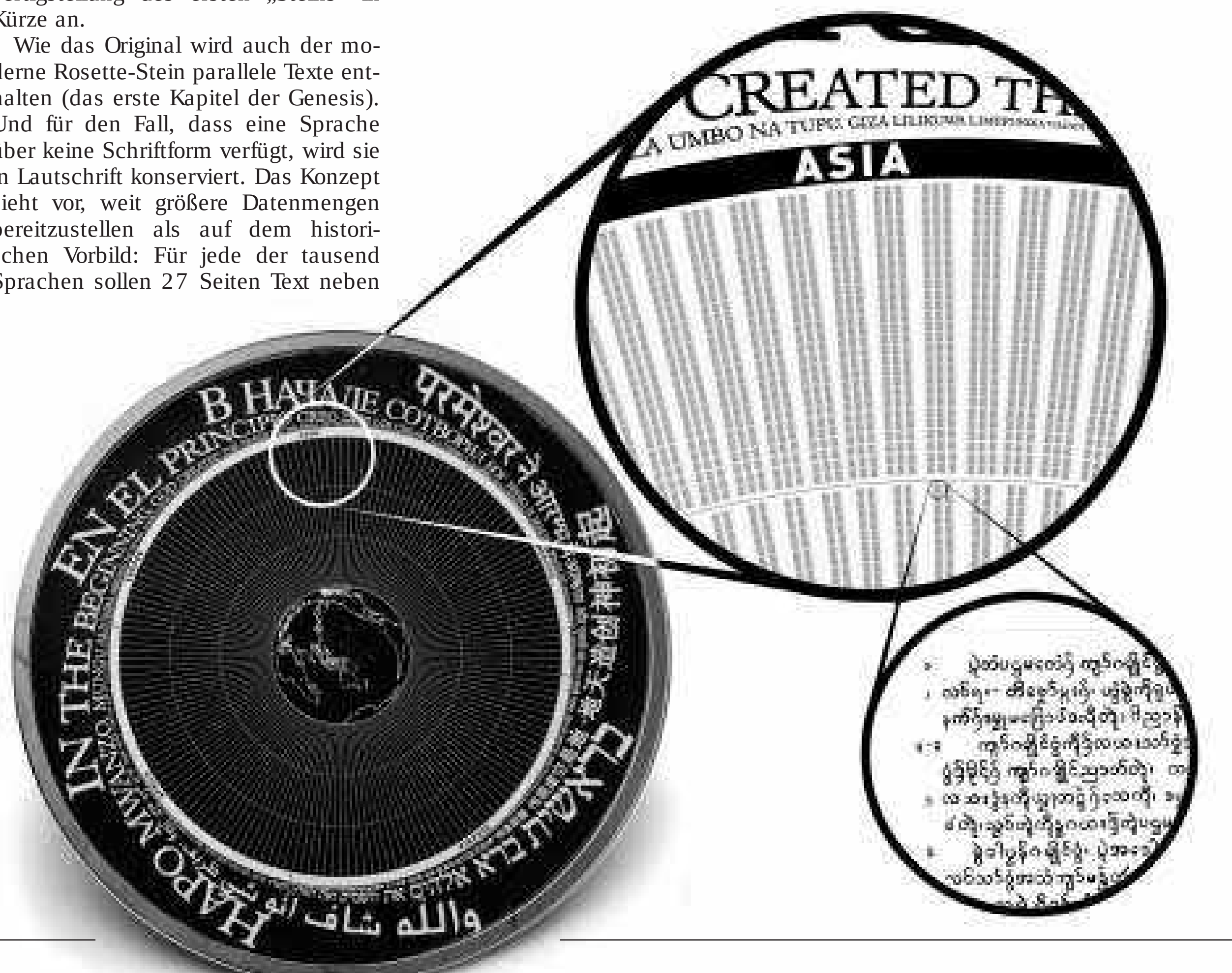


FOTO: ROLFE HORN, MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER LONG NOW FOUNDATION (WWW.LONGNOW.ORG)

tagter Sprecher immer höher sein als die junger Sprecher, die bei diesem Programm mitarbeiten. Aber wir können zumindest erreichen, dass bestimmte Sprachen länger am Leben bleiben.“ Dies lässt den Sprachwissenschaftlern mehr Zeit, die Sprachen zu dokumentieren, bevor sie ganz verloren gehen.

Die Idee des Lehrer-Schüler-Programms hat sich außerhalb der USA leider nicht durchgesetzt, und Hintons Bemühungen sind nur ein Tropfen auf den heißen Stein. Weltweit werden mindestens 417 Sprachen gerade noch von einer Hand voll alter Menschen gesprochen. So heißt es im *Ethnologue*, einem Sprachenkatalog, den das *Summer Institute of Linguistics* (SIL) in Dallas publiziert. Die meisten dieser Sprachen sind in ihrer Grammatik, ihrem Wortschatz, ihrer Aussprache und ihrem Alltagsgebrauch kaum oder überhaupt nicht erfasst.

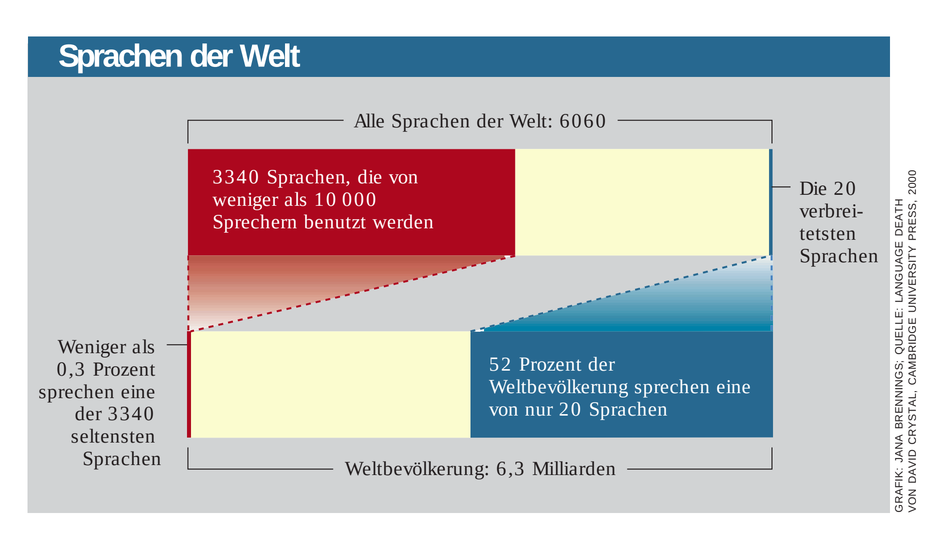
Um diesem Missstand zu begegnen, stellte der *Lisbet Rausing Charitable Fund* für ein gewaltiges Dokumentationsvorhaben dreißig Millionen Dollar zur Verfügung. Barry Supple, ein Berater dieser englischen Stiftung, rechnet damit, dass das Geld für die nächsten acht bis zehn Jahre reichen wird. Ein Teil der Mittel geht etwa an die „Schule für Orientalische und Afrikanische Studien“ in London. Dort lernen Sprachforscher, wie man Feldforschung für aussterbende Sprachen durchführt. Der Hauptanteil wird aber für die Feldforschung selbst verwendet. „Wenn dieses Programm abgeschlossen ist“, erwartet Supple, „werden wir etwa hundert gefährdete Sprachen dokumentiert haben.“

Ein neuer Turm zu Babel

Das Rausing’sche Dokumentationsvorhaben übertrifft zwar sämtliche bisherigen Rettungsprojekte. Eine Nagelprobe wird aber die Frage sein, ob damit alle ausgewählten Sprachen auch konstant und sicher konserviert sowie zugänglich archiviert werden können. „Die Archive, die uns zur Verfügung stehen, sind zumeist ärmlich ausgestattet“, sagt Steven Bird, der stellvertretende Direktor des *Linguistic Data Consortium.*

„Es gibt kein Archiv, das von einer Universität oder nationalen Forschungsstiftung auf unbegrenzte Zeit verwaltet wird, also für mindestens 25 oder 50 Jahre.“ Er warnt davor, dass Sprachen zwar registriert, aber ebenso wieder in Vergessenheit geraten könnten, wenn die gewählte digitale Aufzeichnungstechnik mit der Zeit veraltet.

Ebenso wenig kann es beruhigen, dass dutzende Institute auf der ganzen



Welt jetzt digitale Bibliotheken für gefährdete Sprachen einrichten – das Fundament für einen neuen Turm zu Babel. Denn man beabsichtigt, Datei-Formate, Terminologien und sogar Sprachbezeichnungen einzusetzen, die häufig unkompatibel und womöglich bald schon überholt sind.

Gary Simons bei SIL und zahlreiche Mitstreiter bemühen sich darum, dieses Chaos zu ordnen, indem sie eine *Open Language Archives Community* (Olac; Gemeinschaft für offene Spracharchive) gründeten. Diese benutzt Metadaten – eine Art digitale Dateikarten –, um solche Inkonsistenzen auszugleichen. Olac begann mit seinen Aktivitäten in Europa wie auch in den USA in der ersten Hälfte dieses Jahres und umfasst bisher mehr als 17 Spracharchive – die meisten für gefährdete Sprachen. Wenn das System im kommenden Jahr in die operative Phase eintritt, können Forscher bereits ein umfangreiches Datenangebot anzapfen, um ihre Theorien zu testen: Wie entwickelten sich Sprachen? Wie spiegelt ein Zusammentreffen von Sprachen die Wanderungen der Völker wider? Wo sind die Grenzen der menschlichen Sprache?

Mit dem Verlust seltener Sprachen steigt die Sorge, solche Fragen eines Tages nicht mehr beantworten zu können. Linguistik ist eine junge Wissenschaft, immer noch voller Geheimnisse. Nicholas Ostler nennt ein Beispiel: „Ica, eine Sprache im Norden Kolumbiens, scheint keinerlei Personalpronomina zu besitzen, wie wir sie aus anderen Sprachen kennen – ich, du, er, sie, es, wir, ihr, sie. Ohne Ica hätte ich gedacht, dass dies für alle Sprachen gilt.“

Zweites Beispiel: Verdopplungen – eine Eigenart zahlreicher Sprachen, um den Plural auszudrücken, also etwa Mausmaus für den Plural von Maus. Die fast gänzlich verschwundene Sprache Lushootseed im Gebiet von Puget Sound im US-Bundesstaat Washington, erläutert Bird, zeigt einmalige Besonderheiten. Verdopplungen treten bei ihr in drei Formen auf, als Präfix, Suffix und sogar als Wortstamm. „Wenn derartige Sprachen aussterben, werden wir niemals klären können, welche Verdopplungen es in natürlichen Sprachen gibt.“

Der Trial des Ngan’gitjemerri

Drittes Beispiel: Pluralregeln. Im Englischen und in vielen anderen Sprachen gibt es für fast alle Wörter eine Singular- und eine Pluralform. Früher gab es im Indogermanischen den Dual (die Mehrzahl von zwei). Aber bereits im Gotischen war der Dual nur noch für die erste und zweite Person möglich. Im Bayerischen ist ein Rest davon noch zu erkennen. In ‚enk‘ für ‚euch‘ und ‚es‘ für ‚ihr‘ ist der ehemalige Dual sozusagen gestrandet. Beide Wörter haben heute nicht mehr den ursprünglichen Sinn des Duals, sondern den des Plurals. Im Paar ist davon das gedankliche Muster noch bewahrt.

In wenigen Sprachen wie beispielsweise in Ngan’gitjemerri, einer Aboriginessprache Australiens (vielleicht gerade ausgestorben), gibt es neben Singular und Plural noch den Dual und sogar den Trial, die Mehrzahl für drei. Sprechern des Sursurunga, Tangga und Marshallese stehen sogar fünf Pluralformen zur Verfügung. Wo ist die Grenze? Vielleicht werden wir das nie mehr erfahren.

Selbst wenn eine Sprache vollständig dokumentiert ist, hinterlässt sie nach dem Tod ihres letzten Sprechers nur noch ein fossiles Skelett zusammenhangloser Merkmale. Fallen diese dem Linguisten in die Hände, kann er der verlorenen Sprache lediglich einen vagen Umriss entlocken und eine grobe Einordnung im Stammbaum der Sprachenevolution vornehmen. „Wie beginnen Leute eine Un- ▶

terhaltung? Wie sprechen sie mit Babys? Wie sprechen Partner miteinander?“ fragt die Soziolinguistin Leanne Hinton. „Das sind die ersten Dinge, die man wirklich wissen muss, um eine Sprache wiederzubeleben.“

Es gibt eben noch keinen Wissenschaftszweig der „Erhaltung“ von Sprache, wie es ihn vergleichsweise für die Biologie gibt. Fast alle bisherigen Konservierungsanstrengungen sind zweischneidig, sie gelingen und scheitern zugleich. Ein Beispiel: Vor zwanzig Jahren richteten die Maori in Neuseeland so genannte Sprachnester ein, mit denen Vorschüler an die Eingeborenensprache herangeführt wurden. In der Grundschule und in weiterführenden Klassen wurden dem Lehrplan weitere Maori-Klassen hinzugefügt. Ein ähnlicher Ansatz wurde in Hawaii versucht – nicht ohne Erfolg. Die Anzahl der Sprecher hat die ursprüngliche Zahl von eintausend bereits überschritten, berichtet Joseph Grimes, der für SIL über die Oahu-Sprache arbeitet. Studenten dort können das ganze Studium in Hawaiisch (ka ‘Ùlelo Hawai‘i heißt ‚die Sprache‘) bestreiten. Englisch lernen sie ebenfalls.

Sprachnester als Rettungsinseln

Noch ist es zu früh zu sagen, ob die erste Generation der „Sprachnester“ die Eingeborenensprache auch zu Hause ihren Kindern weitergeben wird. In anderen Regionen stießen Schulen dieser Art bisher nicht immer auf Akzeptanz, ja sogar auf Widerstand. Lediglich die Eingeborenensprache der Navajos in den Vereinigten Staaten wird nach Auskunft des Zentrums für angewandte Sprachen noch in dieser Form weitergegeben. Die Leupp-Grundschule im Navajo-Reservat Arizonas begann ein Förderprogramm, nachdem man festgestellt hatte, dass nur noch sieben Prozent der Studenten Navajo fließend beherrschten. Die Kinder (anfangs im Kindergartenalter, aber jetzt auch bis zur 4. Klasse) benutzen die Sprache bei der Schafzucht, bei ihrer Gartenarbeit, wenn sie Tänze aufführen oder etwas über ihre Kultur lernen. Aber die Organisatoren suchen verzweifelt nach qualifizierten Lehrern, Büchern und Prüfungsvorlagen in Navajo sowie Unterstützung durch die Gemeinden.

Ofelia Zepeda von der Universität von Arizona, vielleicht die prominenteste Streiterin für die Wiederbelebung der Eingeborenensprachen in den Vereinigten Staaten aus den Reihen der Ureinwohner Amerikas, berichtet über ähnliche Probleme mit ihrer eigenen Sprache, Tohono O’odham: „Jeder Stamm steht vor demselben Problem, dass eine ganze Generation von Kindern die Sprache ihrer Eltern nicht mehr beherrscht. Die Behörden unterstützen zwar allgemein das

Die Kultur etwa dieses Eingeborenenstammes der G/wi in Botswana wird nur mündlich tradiert. Geht ihre Sprache verloren, verschwindet damit auch ein Großteil der mündlichen Traditionen: Geschichten, Märchen, Ortskenntnisse und sogar eine einmalige Weltsicht.



Engagement für die Sprachen, aber die Finanzen sind ein Problem. Wir mussten drei Jahre warten, bis unsere Projekte anliefen.“ Und dann, so sieht es die kleine Gemeinschaft dieses Stammes, „sind wir im Grunde doch machtlos. Wir müssen mehr Einfluss auf unsere Gemeindeschulen bekommen“.

Nur weil eine Sprachgemeinde klein ist, heißt das aber noch lange nicht, dass das Schicksal ihrer Sprache besiegelt sein muss. Nach letzten Berichten sprachen beispielsweise ganze 185 Menschen die brasilianische Eingeborenensprache Karitiana, erinnert sich Akira Yamamoto von der Universität von Kansas. Aber sie leben alle im selben Dorf Brasiliens, das ohnehin nur 191 Einwohner zählt. Also sind es 96 Prozent der Sprecher, die ihre Muttersprache an ihre Kinder weitergeben. Und nur weil bei den Erhebungen über gefährdete Sprachen eher die Anzahl der verbleibenden Sprecher Beachtung findet, „haben eine Reihe von Sprachforschern ihren Untergang prophezeit, um sie dann zwanzig Jahre später noch bei bester Gesundheit anzutreffen,“ sagt Sprachforscher Patrick McConvell von der Canberra Universität in Australien.

Nach dem Ansatz des Linguisten Hans-Jürgen Sasse von der Universität zu Köln gibt es einen Faktor, der beim Ableben einer Sprache immer eine Rolle spielt: nämlich wenn die Sprecher beginnen, „die Nützlichkeit ihrer Sprachloyalität zu bezweifeln“. Wenn sie einmal ihre eigene Sprache gegenüber der Sprache der Mehrheit als unterlegen ansehen, hören sie auf, diese in allen Alltagssituationen zu benutzen. Ihre Nachkommen übernehmen dann dieses Verhalten und bevorzugen zunehmend die Sprache der Mehrheit.

„Meist ist dies den Sprechern gar nicht bewusst, bis sie plötzlich feststellen müssen, dass ihre Kinder die Sprache ihrer Eltern nicht mehr benutzen, nicht einmal zu Hause“, klagt Sprachforscher Douglas H. Whalen. So ging es auch mit dem Schottischen, bedauert Hans-Jürgen Sasse. Nicholas Ostler nennt das Beispiel des Irischen, das seit der Gründung des Irischen Staates trotz seines Status als Amtssprache von immer weniger Iren gesprochen wird.

„Die Antwort auf das Sprachensterben ist die Mehrsprachigkeit,“ behauptet Berkeley-Forscher James Matisoff. „Sogar Analphabeten können mehrere Sprachen erlernen, solange sie damit im Kindesalter beginnen“, betont er. In der Tat sprechen die meisten Menschen auf der Welt mehr als eine Sprache. In Gebieten wie Kamerun (mit 279 Sprachen), Papua-Neuguinea (823) oder Indien (398) ist es völlig normal, dass man drei oder vier verschiedene Sprachen beherrscht, dazu noch ein oder zwei Dialekte.

Linguist Joe Grimes vom SIL registriert mit Bedauern, dass „die meisten Amerikaner und Kanadier westlich von Quebec die Tatsache als peinlich empfinden, wenn ein Mensch in ihrer Anwesenheit eine andere Sprache spricht“. Genauso sei es in Australien oder Russland. „Nicht zufällig verschwinden in diesen Regionen Sprachen am schnellsten.“

Der erste Schritt zur Rettung gefährdeter Sprachen wäre, dass die Mehrheiten der Welt es ihren Minderheiten gestatten, sich untereinander in ihrer eigenen Sprache zu verständigen. ■

INTERVIEW



PETER JOHNSON / CORBIS

Dieter Wunderlich ist Professor für Allgemeine Sprachwissenschaft an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Spektrum: *Sollte man aussterbende Sprachen schützen?*

Wunderlich: Man kann Sprachen als solche natürlich überhaupt nicht schützen. Man kann einer Bevölkerungsgruppe das Recht geben, in der eigenen Sprache zu kommunizieren, die Kinder in ihr zu erziehen, einschließlich des Schreiben- und Lesenkönnens. Und vor allem muss man der Bevölkerungsgruppe die Möglichkeit geben, ihre Identität in der angestammten Sprache zu bewahren, also muss diese Sprache auch ein Prestige haben können.

Spektrum: *Gibt es Sprachen, die wertvoller sind als andere?*

Wunderlich: Viele Sprachen haben bestimmte grammatische Parameter, also Lautstruktur, Wortstruktur und Syntax, in einer Weise ausgeprägt, die wir von den bekannteren Sprachen nicht kennen. Beinahe jede Sprache hat ihre Spezialitäten. Für die Kenntnis dessen, was in den Grammatiken von Sprachen prinzipiell möglich ist, ist es wünschenswert, so viele Sprachen wie möglich untersuchen zu können. Im Prinzip sind alle Sprachen interessant, besonders natürlich diejenigen, die eine ganze Sprachfamilie und womöglich eine sehr alte Sprachfamilie repräsentieren.

Spektrum: *Was geht Ihrer Meinung nach wirklich verloren, wenn eine Sprache ausstirbt?*

Wunderlich: Viele Besonderheiten kommen nur in ganz bestimmten Sprachen vor, etwa Konsonantensysteme, Klassifikatoren für Gegenstände, Verfahren für komplexe Prädikate oder der Raum-Zeit-Bezug. Solche Aspekte kann man sich nicht ausdenken, man kann nur durch konkrete Sprachen auf sie gestoßen werden.

Spektrum: *Kann man Sprachen wiederbeleben?*

Wunderlich: Nein, allenfalls wenn sie schon gut dokumentiert sind. Stirbt eine Sprache, so sehe ich darin einen unwiederbringlichen Verlust für die Menschheit. Die meisten denken zunächst vielleicht eher an den Verlust von Poesie, Mythos, Ritualen. Als Linguist sehe ich den Verlust vor allem in den elementaren grammatischen Voraussetzungen, um solche kulturellen Eigenheiten überhaupt ausprägen zu können.

Interview: ***Reinhard Breuer***

W. Wayt Gibbs *ist Redakteur bei Scientific American.*

Literaturhinweise

Lost Languages – The Enigma of the World's Undeciphered Scripts. Von Andrew Robinson. McGraw-Hill, New York 2002.

The Green Book of Language Revitalization in Practice. Von Leanne Hinton und Kenneth Hale (Hg.). Academic Press, 2001.

On Biocultural Diversity. Von Luisa Maffi (Hg.). Smithsonian Institution Press, 2001.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“*

Test auf bakterielle Infektion

Das nasskalte Novemberwetter strapaziert die Körperabwehr, Fieber und Husten sind oft die Folge. Vermutet der Arzt eine bakterielle Infektion, beschließt er vielleicht, seine Diagnose durch einen Labortest abzusichern und nimmt mit einem Spatel einen Rachenabstrich.

Diese Probe wird einem spezialisierten Labor zugeschickt. Dort bearbeitet sie eine medizinisch-technische Assistentin (MTA) unter einem Abzug, der die Raumluft durch ein Filtersystem leitet und so von Krankheitserregern reinigt. Das verringert nicht nur die Ansteckungsgefahr für die MTA, sondern schützt die Probe auch vor dem Eintrag von Keimen. Verschiedene Tests sollen dann den Kreis der in Frage kommenden Krankheitserreger mehr und mehr einengen sowie nach Möglichkeit auch seine Widerstandsfähigkeit (Resistenz) gegen die verfügbaren Antibiotika prüfen. Ein bis zwei Tage nach dem Arztbesuch sind die Versuche abgeschlossen, Diagnose und Therapie abgeklärt.

Solche Labortests können umfangreich und kostspielig sein und noch dazu viel Zeit benötigen. Hundertprozentig sicher sind sie jedoch nicht. Moderne Techniken der Molekularbiologie, beispielsweise DNA-Chips, die genetisches Material von Erregern effektiv und schnell entdecken können, sollen die Effizienz künftig deutlich verbessern (siehe Spektrum der Wissenschaft 06/2002, S. 62).

Mark Fischetti

Der Autor ist Redakteur bei Scientific American. Wir danken dem Mikrobiologen Ulrich Eigner und dem Virologen Jan Bartel für fachliche Beratung.



ANZUCHT
Eine medizinisch-technische Assistentin (MTA) bestreicht einen gelatineartigen Agar-Nährboden in einer Petrischale mit infizierten Zellen des Patienten. Dann wird die Probe für 24 Stunden bei 37 Grad, also Körpertemperatur, in den Brutschrank gestellt. In dieser Zeit verwerten die Bakterien Nährstoffe, etwa Schafsblut, die dem Agar zugesetzt sind, vermehren sich und bilden Kolonien – Material für weitere Tests.

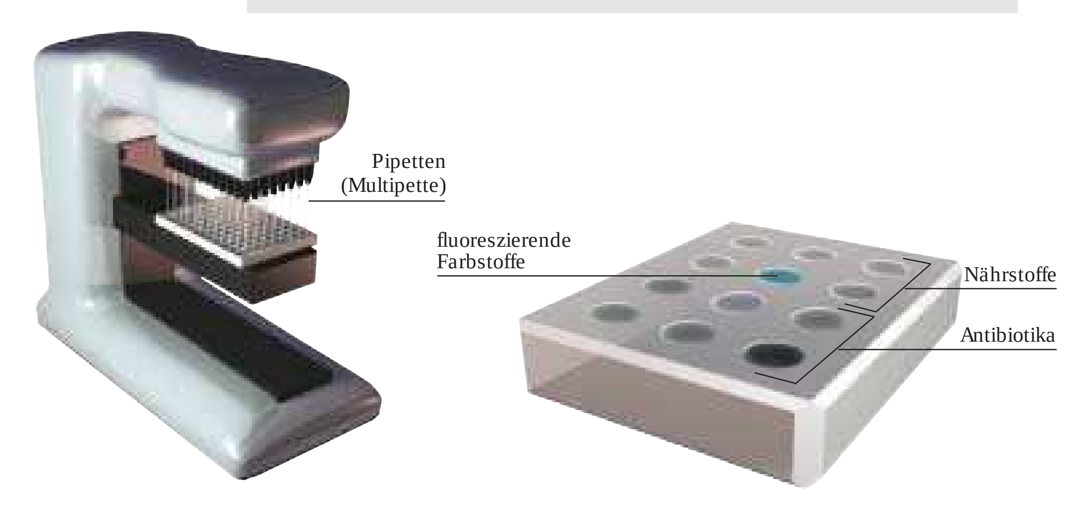
SICHTBARKEIT DURCH FÄRBEN
Die MTA bringt Bakterien auf einen gläsernen Objektträger auf. Durch kurzes Erhitzen über einer Flamme werden die Keime fixiert. Als Nächstes tropft sie einen speziellen blauen Farbstoff auf, spült das Plättchen mit 96-prozentigem Alkohol und gibt anschließend einen roten Farbstoff hinzu. Auf Grund der Struktur ihrer Zellwand bauen die meisten kugelförmigen Bakterien – dazu gehören Pneumokokken (Lungenentzündung) und Staphylokokken (Wundinfektionen) – den blauen Farbstoff fest ein. Bei anderen Bakterien wie Salmonellen oder *Escherichia coli* löst ihn der Alkohol wieder heraus. Sie erscheinen deshalb nach der zweiten Färbung unter dem Mikroskop rot. Das erlaubt eine erste grobe Unterscheidung in grampositive oder gramnegative Erreger (das Färbeverfahren hat der dänische Pathologe Christoph Joachim Gram (1853–1938) entwickelt). Die MTA kann zudem prüfen, ob die nun sichtbaren Keime rund oder stabförmig sind, ob sie Haufen oder Ketten bilden.

Wussten Sie schon … ?

➤ Agar-Agar (das Wort kommt aus dem Malaiischen) ist ein Extrakt aus bestimmten Rotalgen, beim Abkühlen der heißen wässrigen Lösung bildet sich ein festes Gel aus Polysacchariden. Es wird in der Lebensmittelindustrie, bei der Herstellung von Nährböden, in der Pharmazie und als Trägermaterial bei Gelchromatografie verwendet. Es dient beispielsweise als Abführmittel, zum Verdicken von Lebensmitteln, als Gelatine in der chinesischen Küche und als Basis japanischer Süßigkeiten.

➤ In Deutschland müssen sich medizinische Laboratorien vom Deutschen Akkreditierungsrat anerkennen lassen. Erlaubt sind Methoden, die sich bei einer Vielzahl von Laboratorien als geeignet, ortsunabhängig reproduzierbar und schnell erwiesen haben. Die Einrichtungen werden von einem Arzt für Laboratoriumsmedizin geleitet. Sie rechnen direkt mit den Krankenkassen oder dem Patienten ab. Bei meldepflichtigen Krankheiten wie Pest, Milzbrand oder Cholera müssen die staatlichen Gesundheitsbehörden informiert werden.

➤ Viren sind für die Beobachtung durch herkömmliche Mikroskope zu klein, daher werden sie immunologisch durch Antigen-Antikörper-Reaktionen bestimmt. Besteht etwa nach einem Zeckenbiss ein Verdacht auf Zeckenenzephalitis, wird Blutserum, also der klare Bestandteil des Patientenblutes, in kleine Vertiefungen auf Plastikträgern getropft. Darin befinden sich charakteristische Antigene der fraglichen Viren, gewissermaßen Angelhaken für Antikörper, die das Immunsystem des Patienten bei einer Infektion speziell gegen diese Erreger gebildet hätte. Gibt es in so einer Vertiefung eine Reaktion, ist das Virus identifiziert. Wichtig sind auch zunehmend molekularbiologische Methoden wie der Nachweis bestimmter Nucleinsäuren aus dem Erbgut eines Virus, etwa bei Aids und chronischer Hepatitis.



IDENTIFIKATION UND RESISTENZTEST
Vertiefungen in einer Kunststoffplatte enthalten Nährstoffe wie Zucker und Aminosäuren. Hinzu kommen Reagenzien, die einen typischen Farbumschlag bewirken, wenn der Erreger ein Substrat verwerten konnte. Diese „bunte Reihe“ ermöglicht die genaue Bestimmung der Spezies. Um die Wirksamkeit möglicher Wirkstoffe gegen den Erreger zu prüfen, benutzt die MTA ebenfalls Kunstoffplatten mit kleinen Vertiefungen. Diesmal enthalten sie Antibiotikalösungen verschiedener Konzentration. Nach etwa 16–20 Stunden Bebrüten kann sich die MTA das Ergebnis ansehen, auch eine Vermessung durch elektronische Sensoren ist möglich. Hat sich die Lösung getrübt, konnten die Keime wachsen, sind also offenbar gegen den speziellen Wirkstoff resistent; im anderen Fall ist die Probe klar. Bei einem älteren Verfahren beimpft die MTA eine Agar-Agar-Platte mit dem Bakterium und verwendet einen Stempel, um antibiotikumhaltige Filter aufzubringen. Die Keime können in Bereichen wirksamer Gegenmittel nicht wachsen und bilden Hemmhöfe auf der Platte – je größer der Durchmesser, desto empfindlicher reagierten die Keime. Dieses Verfahren lässt sich allerdings nur schwer automatisieren.

Wenn Hände falsch fühlen

Ähnlich wie die Augen bei optischen geometrischen Täuschungen können sich auch Hände verschätzen. Manchmal macht der Tastsinn sogar die gleichen Fehler.

Von Édouard Gentaz und Yvette Hatwell

Meistens dürfen wir unseren Sinnen trauen. Sehr präzise erzählen sie uns, was mit unserer Umgebung los ist. Doch es gibt Ausnahmen. Dann werden wir getäuscht.

Allgemein bekannt sind optische Täuschungen, zum Beispiel bei räumlichen Proportionen. Solche geometrischen Illusionen nutzten schon Baumeister und Künstler der Antike. Um räumliche Tiefe zu erzeugen, wenden etwa Bühnenbildner sie auch heute an. Denn in vielen Fällen sieht der Mensch die Verhältnisse weiterhin trügerisch, selbst wenn er um den Trick weiß.

Im 18. und noch stärker im 19. Jahrhundert begannen Wissenschaftler, optische Täuschungen genauer zu erforschen. Sie benannten einige davon nach den Namen der Entdecker. Die Forscher glaubten bis ins 20. Jahrhundert hinein, nur das Auge als einziges Sinnesorgan lasse sich in der Weise beirren. Fehlwahrnehmungen schrieben sie dem Aufbau des Auges zu. Dagegen postulierte die damals aufblühende Gestalttheorie, solche Fehlleistungen verursache das Gehirn. Es setze die wahrgenommenen Einzelteile einer Figur zu einem Gesamtbild zusammen. Die Täuschungen entstünden durch Wechselwirkungen zwischen den Wahrnehmungen der Einzelteile. Also nahmen die Gestalttheoretiker an, das Gehirn würde alle Sinne gleich behandeln. Selbst Täuschungen mussten darum für alle Sinne die gleichen sein.

Dass dies nicht grundsätzlich stimmt, erkannte 1933 der holländische Gestaltpsychologe Georg Revesz. Doch er entdeckte auch, dass zumindest die so genannte Müller-Lyer'sche Täuschung beide Sinne betrifft. (Hierbei erscheint die gleiche Linie länger, wenn die Struktur etwa durch Pfeile an beiden Enden verlängert wird; siehe Bild Seite 76.) ▶



Eine klassische optische Täuschung, die ähnlich beim Ertasten von Figuren auftritt: Entgegen dem Anschein ist der Gateway Arch von Saint Louis in Missouri nicht höher als breit. Der 191 Meter hohe Stahlbogen am rechten Ufer des Mississippi wurde vor vierzig Jahren errichtet: als Symbol dafür, dass von hier die Besiedlung des Westens ausging.

AG. DITE/USIS, PARIS



Trotz der langen Forschungsgeschichte konnten die Wissenschaftler bis heute nicht grundsätzlich klären, inwieweit Bau und Funktionsweise des Auges oder die Verarbeitung der Sinnesreize im Gehirn eine optische Illusion hervorrufen. Sie vermochten hierfür immer noch keine übergeordnete Theorie zu entwickeln.

Erst seit etwa vierzig Jahren erforschen Psychologen geometrische Täuschungen des Tastsinns systematisch. Unter anderem wollen sie dadurch auch die visuellen räumlichen Illusionen besser verstehen. Denn Fälle von ähnlichen Erscheinungen bei beiden Sinnen würden auf eine Beteiligung derselben oder vergleichbarer Gehirnmechanismen hinweisen. Andernfalls, wenn eine Figur nur eine optische Illusion hervorruft, könnte es sich eher um einen Mechanismus im Auge handeln.

An sich erfassen Gesichts- und Tastsinn die Welt auf ganz verschiedene Art. Der Gesichtssinn ist ein Distanzsinn, der einen großen Bereich des Raumes praktisch auf einmal erfassen kann. Der Tastsinn als Kontaktsinn nimmt – in vielen Schritten nacheinander – einen kleinen Ausschnitt des Umfeldes auf. Allerdings kann die Person zum Ausgleich Körperteile bewegen oder selbst im Raum umhergehen. Streng genommen werden bei einer taktilen Wahrnehmung nur die Erregungen der Tastsinneszellen in der Haut verrechnet. Doch beim Abtasten von Figuren erfasst das Zentralnervensystem auch Stellung und Bewegung der Gelenke sowie die motorischen Befehle zur Bewegung von Fingern, Händen und Gliedmaßen. Physiologen sprechen darum genauer nicht vom Tastsinn, sondern vom haptischen Sinn. Der Einfachheit halber verwende ich im Folgenden aber in den Regel den Begriff taktil, wenn ich haptisch meine.

Täuschende Pfeile

In Vergleichsstudien, wie sie hier vorgestellt werden, bewegen die Versuchspersonen nur Hände oder Arme. Gewöhnlich sollen sie mit einem Finger tasten. Die Wissenschaftler legen ihnen für beide Sinne im Prinzip die gleichen Bilder vor. Nur sind die Formen im einen Fall gezeichnet, im anderen stehen die Linien reliefartig hervor. Beim Tasten operieren die Probanden mit verbundenen Augen.

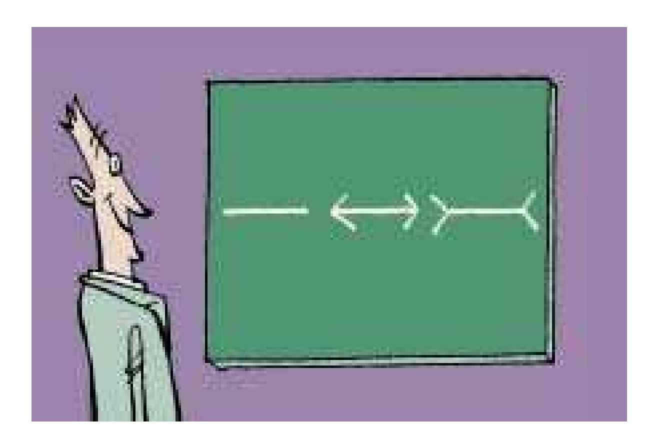
Besonders aufschlussreich ist oft der Vergleich mit blinden Personen, um die beteiligten physiologischen Mechanismen zu klären. Für manche Illusionen macht es sogar einen Unterschied, ob jemand von Geburt an blind ist oder erst später im Leben das Augenlicht verlor. Spät Erblindete nutzen, wie Sehende, beim Tasten mentale Bilder, die von Seherfahrungen stammen. Andererseits kompensieren von Geburt an Blinde vieles durch einen hervorragend geübten Tastsinn. Der Vergleich gibt dennoch Aufschluss, ob eine geometrische Illusion allein auf visueller Erfahrung beruht. Wenn umgekehrt eigenständige taktile Prozesse mitwirken, erleben auch Geburtsblinde die taktile Täuschung.

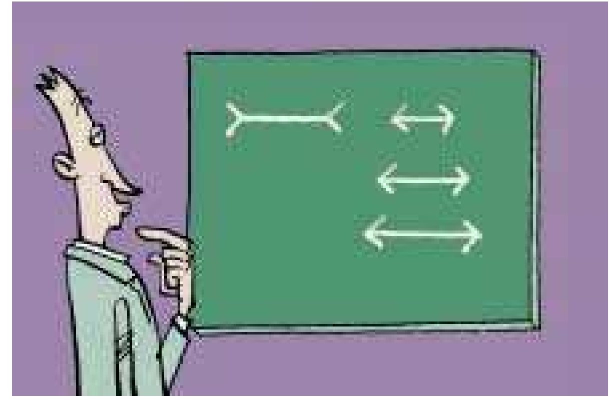
Wir haben drei bekannte geometrische Illusionen untersucht:

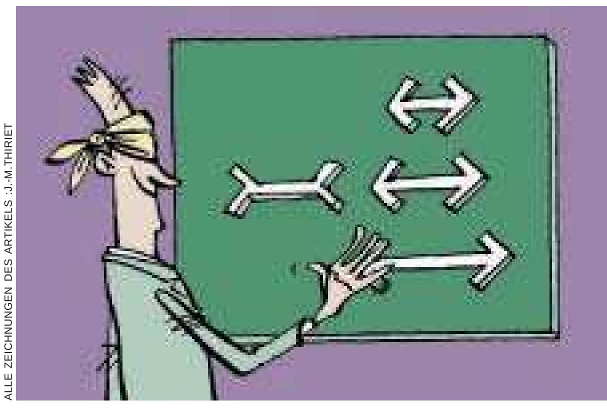
- die Müller-Lyer'sche Täuschung,
- die Vertikalen-Täuschung
- und die Illusion von Delbœuf.

Der in Straßburg und München tätige Psychologe und Soziologe Franz Carl Müller-Lyer (1857–1916) beschrieb 1889, dass man die wahrgenommene Länge einer geraden Linie durch Pfeilspitzen an den Enden verändern kann. Insbesondere wirkt die Linie länger, wenn die Pfeilspitzen von außen her zur Linie zeigen. Gleiches gelingt mit anderen Strukturen an den Enden der Linie, die das gesamte Gebilde verlängern. Viele Studien haben erwiesen, dass der Tastsinn der gleichen Illusion unterliegt. Auch Blindgeborene erleben diese Täuschung.

Wie groß der Effekt bei sehenden Erwachsenen ist, maßen vor zehn Jahren japanische Forscher von der Universität Niigata. Die Versuchspersonen sahen auf einer Tafel nebeneinander zwei Linien, an deren Enden rechtwinkelige Pfeilspitzen saßen. Die linke Linie blieb immer gleich lang: drei Zentimeter, wobei die Pfeilspitzen zur Linie hin zeigten. An der rechten Linie wiesen die Pfeilspitzen nach außen;







ALLE ZEICHNUNGEN DES ARTIKELS: J.-M.THIRIET

Die Müller-Lyer'sche Täuschung: Eine Linie mit nach außen offenen Pfeilspitzen erscheint uns länger als eine gleich lange Linie mit umgekehrten Pfeilen (oben). Diese Illusion tritt auch beim Tasten mit verbundenen Augen auf.

sie verlängerten die Linie nicht. Die Länge dieser rechten Linie veränderte der Experimentator jeweils, und die Teilnehmer sollten angeben, wann beide Linien ihrer Ansicht nach gleich lang waren.

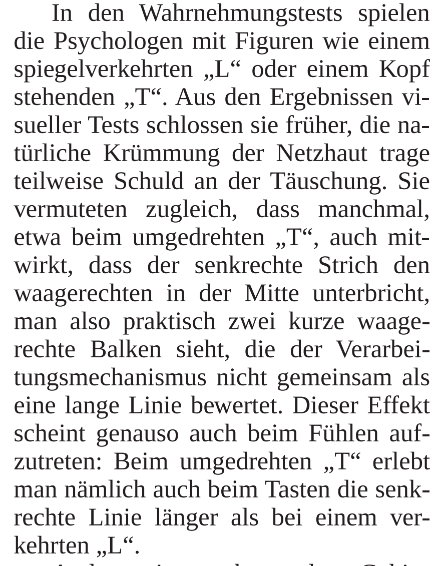
Im Sehtest überschätzten die Versuchspersonen die linke Linie um den Faktor 1,3. Das heißt, sie hielten den Strich mit den von außen kommenden Pfeilarmen für dreißig Prozent länger, als er wirklich war, und wählten auf der rechten Seite eine um den entsprechenden Anteil zu lange Figur. Das gleiche Ergebnis kam heraus, als diese Personen bei verbundenen Augen mit einem Finger die gleichen Figuren fühlen sollten. Auch hierbei erschien ihnen die Figur mit den nach außen ragenden Strichen um fast ein Drittel länger als in Wirklichkeit.

Die optische und die haptische Müller-Lyer'sche Täuschung stimmen noch in anderer Hinsicht überein. Die Illusion erscheint etwa in beiden Fällen umso ausgeprägter, je spitzer die Pfeile sind. Dieses Phänomen entdeckte 1966 Ray Over von der Universität Otago (Neuseeland). Auch nimmt die Fehleinschätzung bei beiden Sinnen während wiederholter Versuche ab, sogar dann, wenn der Versuchsperson der Sinnesfehler nicht bewusst wird. Den Gewöhnungseffekt wiesen Rita Rudel und Hans-Lukas Teuber vom Massachusetts Institute of Technology bereits 1963 nach.

Kopf stehende Buchstaben

Die Vertikalen-Täuschung – auch Mittelsenkrechten-Täuschung oder Horizontal-Vertikal-Täuschung genannt – lässt einen senkrechten Balken länger erscheinen als einen gleich langen waagerechten, auf dem der senkrechte Balken steht (siehe Bilder unten). Diese Illusion – Höhe gegen Breite – nutzte der Architekt Eero Saarinen, als er den Gateway Arch entwarf, das Wahrzeichen von Saint Louis in Missouri (siehe Bild Seite 74/75).

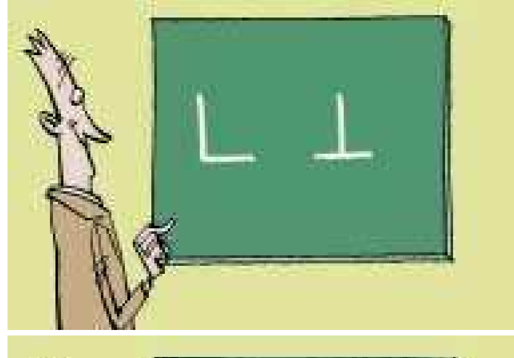
Der gleiche Illusionseffekt tritt beim Tasten auf. Er ist sogar gleich groß. Sehende Personen überschätzen die senkrechte Linie in beiden Fällen um zwanzig Prozent. Dieselbe Täuschung erfahren auch blinde Menschen, selbst Personen, die niemals sehen konnten.

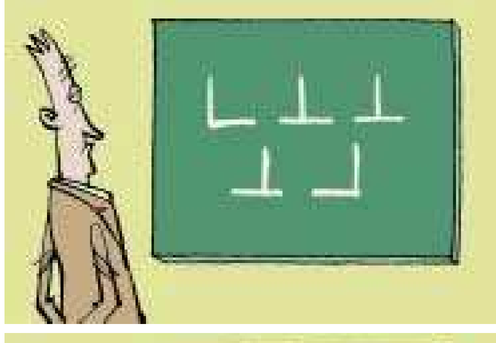


In den Wahrnehmungstests spielen die Psychologen mit Figuren wie einem spiegelverkehrten „L“ oder einem Kopf stehenden „T“. Aus den Ergebnissen visueller Tests schlossen sie früher, die natürliche Krümmung der Netzhaut trage teilweise Schuld an der Täuschung. Sie vermuteten zugleich, dass manchmal, etwa beim umgedrehten „T“, auch mitwirkt, dass der senkrechte Strich den waagerechten in der Mitte unterbricht, man also praktisch zwei kurze waagerechte Balken sieht, die der Verarbeitungsmechanismus nicht gemeinsam als eine lange Linie bewertet. Dieser Effekt scheint genauso auch beim Fühlen aufzutreten: Beim umgedrehten „T“ erlebt man nämlich auch beim Tasten die senkrechte Linie länger als bei einem verkehrten „L“.

Andererseits rechnet das Gehirn beim Ertasten einer Figur offensichtlich die Bewegung der Gliedmaßen mit ein. Dies wies vor einigen Jahren Tong Wong von der Universität Stirling (Schottland) nach. Meistens liegt das zu ertastende Bild vor der Versuchsperson flach auf dem Tisch. Das bedeutet aber, dass diese den Finger, die Hand oder den Arm vom Körper weg bewegen muss, wenn sie den senkrechten Balken abtastet. Für den waagerechten Balken bleibt die Bewegung etwa im gleichen Abstand zum Körper. Ähnliches könnte bei der visuellen Illusion mitwirken: Auch hierbei liegt die Zeichnung oft flach auf dem Tisch, und die Versuchsperson schaut sozusagen tiefer in den Raum, wenn ihre Augen den senkrechten Balken abfahren.

Anscheinend erfordern jedoch beim Tasten die verschiedenartigen Bewegungen unterschiedliche mechanische Belastungen der Muskeln und Knochen. Es dauert außerdem länger, den Arm vom Körper fort oder zu ihm hin zu bewegen. Wir wollten darum wissen, was geschieht, wenn man die Figuren zum Er-

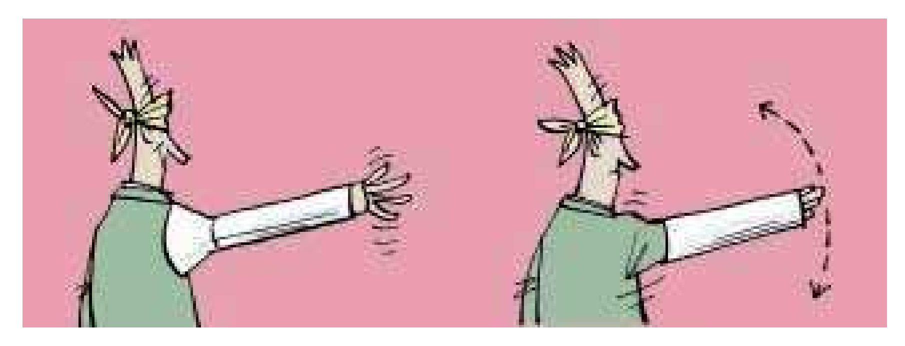


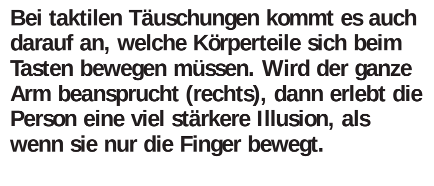




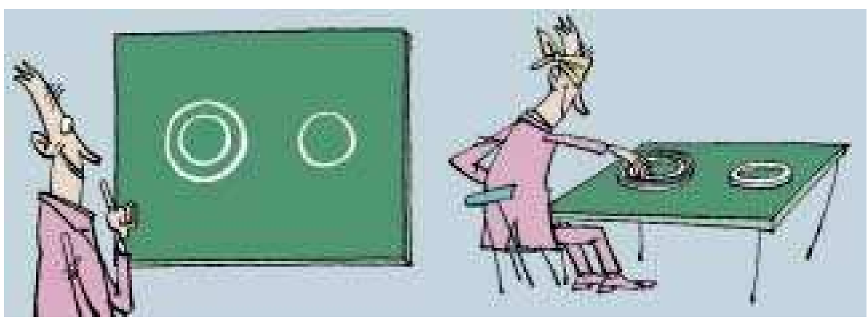
Die Vertikalen-Täuschung: Bei einem umgedrehten „L“ oder „T“ mit gleich langen Linien scheint das senkrechte Element länger zu sein als das horizontale. Auch der Tastsinn wird davon getäuscht. Doch wirkt dann auch die Bewegungsrichtung des Armes mit.







Bei taktilen Täuschungen kommt es auch darauf an, welche Körperteile sich beim Tasten bewegen müssen. Wird der ganze Arm beansprucht (rechts), dann erlebt die Person eine viel stärkere Illusion, als wenn sie nur die Finger bewegt.



Die Delbœuf'sche Täuschung: Ein von einem größeren Kreis umschlossener Kreis wirkt kleiner als ein gleichgroßer nackter Kreis. Beim Tasten tritt diese Illusion nicht auf.

tasten senkrecht darbietet, also an der Wand oder auf einer aufgehängten Tafel. Eigentlich müsste der Effekt jetzt verschwinden, und beim verkehrten „L" tut er das tatsächlich. Beim Kopf stehenden „T" bleibt er allerdings bestehen. Nach unserer Vermutung macht sich in dem Fall wie bei der visuellen Illusion die Zweiteilung bemerkbar.

Zur taktilen Vertikalen-Täuschung trägt außerdem die Größe der Bewegung bei. Forscher von der Universität von Illinois entdeckten: Die Einschätzung wird besser, wenn die Figur so klein ist, dass der Zeigefinger zum Abtasten genügt. Die größte Illusion tritt auf, wenn man den ganzen Arm bewegen muss. Solche ausgreifenden Bewegungen sind wohl zum Abtasten ursprünglich nicht vorgesehen. Es dürfte kein Zufall sein, dass ausgerechnet unsere Hände unsere besten Tastinstrumente darstellen.

Der Bewegungseffekt dürfte unerkannt den Ausgang früherer Tastexperimente beeinflusst haben, wie Vergleichsstudien derselben amerikanischen Wissenschaftler zeigten. Sie ließen die Versuchsteilnehmer beim Tasten mit dem Finger manchmal den Unterarm auf den Tisch auflegen, manchmal in der Luft halten. Tatsächlich war die Illusion bei erhobenem Arm stärker.

Als Nächstes stellten diese Psychologen verschiedene Teile des Armes ihrer Probanden durch übergestülpte Röhren ruhig (siehe Bilder ganz oben). Ein Teil der Versuchsteilnehmer konnte beim Tasten keinen Finger mehr krümmen und auch nicht das Handgelenk oder den Ellbogen rühren; sie mussten dazu also den ganzen Arm im Schultergelenk bewegen. Andere Teilnehmer erhielten Röhren, in denen Schulter- und Ellbogengelenk arretiert waren. Die Finger blieben aber beweglich. Wie erwartet ergab die Bewegung des ganzen Armes von der Schulter aus einen starken Täuschungseffekt, während bei einer Bewegung allein des Fingers eine sehr geringe Fehleinschätzung auftrat, wenn überhaupt. Das Ausmaß des Schätzfehlers hängt, wie wir herausfanden, auch von der Größe der zu ertastenden Figur ab. Je größer der erfasste Raum, umso ausgeprägter wird die Fehleinschätzung. Vermutlich verrechnet das Gehirn dabei auch die Muskelkraft gegen die Schwerkraft.

Analytisches Tasten

Bei der dritten hier besprochenen Illusion, der Täuschung von Delbœuf (benannt nach Joseph Delbœuf, 1831–1896), geht es um die Größe eines von einem anderen umschlossenen Kreises. Man hält den inneren Kreis für kleiner, als er wirklich ist (siehe Bilder oben). Als optische Täuschung ist diese Fehleinschätzung lange bekannt.

Wie nun eine von uns (Hatwell) zeigte, tritt diese Illusion beim Tasten nicht auf. Sie kommt selbst dann nicht vor, wenn die Verhältnisse der Kreise für die optische Täuschung optimal sind. Genauso wenig erleben Geburtsblinde oder spät Erblindete diese Täuschung.

Hatwell beobachtete die Versuchspersonen genauer. Sie erkannte, dass die Tastbewegungen hierbei einem völlig anderen Schema folgen als beim Sehen. Die Probanden untersuchen das Objekt von der Mitte ausgehend. Sie fahren zunächst mit der Kuppe des Zeigefingers nur am inneren Kreis entlang und wechseln dann zum Vergleichskreis daneben. Den äußeren Kreis beachten sie dabei im Grunde gar nicht.

Dieses Ergebnis weist auf einen grundsätzlichen Unterschied beider Sinne hin. Der Tastsinn arbeitet viel stärker analytisch: Er zerlegt die Figuren in Einzelelemente, die er nacheinander erfasst.

Wie sich zeigt, treten nicht alle optisch-geometrischen Täuschungen auch beim Fühlen mit den Händen auf. Manche sind zwar beiden Sinnen gemeinsam. Sie könnten folglich weitgehend auf übergeordneten Eigenschaften des Gehirns beruhen, scheinen also nicht von den einzelnen Sinnesorganen selbst abzuhängen. Doch offenbar existieren auch sinnesspezifische Mechanismen sowohl für das Auge als auch für die Hände. Insgesamt lässt sich der Tastsinn weniger leicht täuschen. ■

Édouard Gentaz *forscht an der Universität René Descartes in Paris im Labor für Kognition und Entwicklung.* ***Yvette Hatwell*** *ist emeritierte Professorin für Psychologie. Sie arbeitet am experimentalpsychologischen Labor der Université Pierre Mendèz-France in Grenoble.*

Literaturhinweis

Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle. Von Yvette Hatwell, Arlette Streri und Édouard Gentaz. PUF, 2000.

Weblinks bei **www.spektrum.de** *unter „Inhaltsverzeichnis"*

Tiefschürfen in Datenbanken

Inhalt

Ein Einkauf im Supermarkt, ein Telefongespräch, ein Klick im Internet: Die Spuren solcher Allerweltsaktionen häufen sich zu Datengebirgen ungeheuren Ausmaßes. Darin noch das Wesentliche – was immer das sein mag – zu finden, ist die Aufgabe des noch jungen Wissenschaftszweigs Data Mining, der mit offiziellem Namen „Wissensentdeckung in Datenbanken" heißt.

Suche im Datendschungel

Es geht darum, in großen Datenmengen etwas zu entdecken, von dessen Existenz man noch nichts weiß.

Von Rudolf Kruse und Christian Borgelt

Der dänische Adlige und Astronom Tycho Brahe (1546–1601) ist eine tragische Figur. Indem er über mehrere Jahre hinweg Daten in bis dahin unübertroffener Menge und Qualität sammelte, vollbrachte er eine bedeutende wissenschaftliche Leistung; und doch ist sein Werk heute fast vergessen.

Auf der 1576 errichteten Sternwarte auf der Insel Ven, etwa dreißig Kilometer nordöstlich von Kopenhagen, bestimmte er mit den besten Instrumenten seiner Zeit die Positionen der Sonne, des Mondes und der Planeten mit einer Genauigkeit von einer Bogenminute: große Mengen von Daten. Aber er war nicht in der Lage, sie in einem einheitlichen Schema zusammenzufassen. Er konnte genau sagen, wo der Mars an einem bestimmten Tag des Jahres 1582 gestanden hatte, aber er konnte die Positionen an verschiedenen Tagen nicht durch eine Theorie in Beziehung setzen. Alle Hypothesen, die er aufstellte, scheiterten an seinen hochgenauen Daten, auch das von ihm selbst entwickelte Planetensystem, in dem sich Sonne und Mond um die Erde, alle anderen Planeten aber auf Kreisen um die Sonne bewegen.

Eine brauchbare Theorie fand erst sein Gehilfe, der deutsche Astronom Johannes Kepler. Er suchte nach einer mathematischen Beschreibung, was für seine Zeit ein geradezu radikaler Ansatz war. Nach vielen erfolglosen Versuchen gelang es Kepler schließlich, die von Tycho Brahe gesammelten Daten in den drei einfachen Gesetzen zusammenzufassen, die heute Keplers Namen tragen.

Die Kataloge Tycho Brahes haben heute nur noch historischen Wert. Keplers Gesetze werden dagegen in allen Astronomie- und Physiklehrbüchern behandelt, denn sie geben die Prinzipien an, nach denen sich sowohl Planeten als auch Kometen bewegen. Außerdem lassen sie Voraussagen zu: Kennt man die Position eines Planeten zu einem bestimmten Zeitpunkt, so kann man mit Hilfe der Kepler'schen Gesetze seine weitere Bahn berechnen.

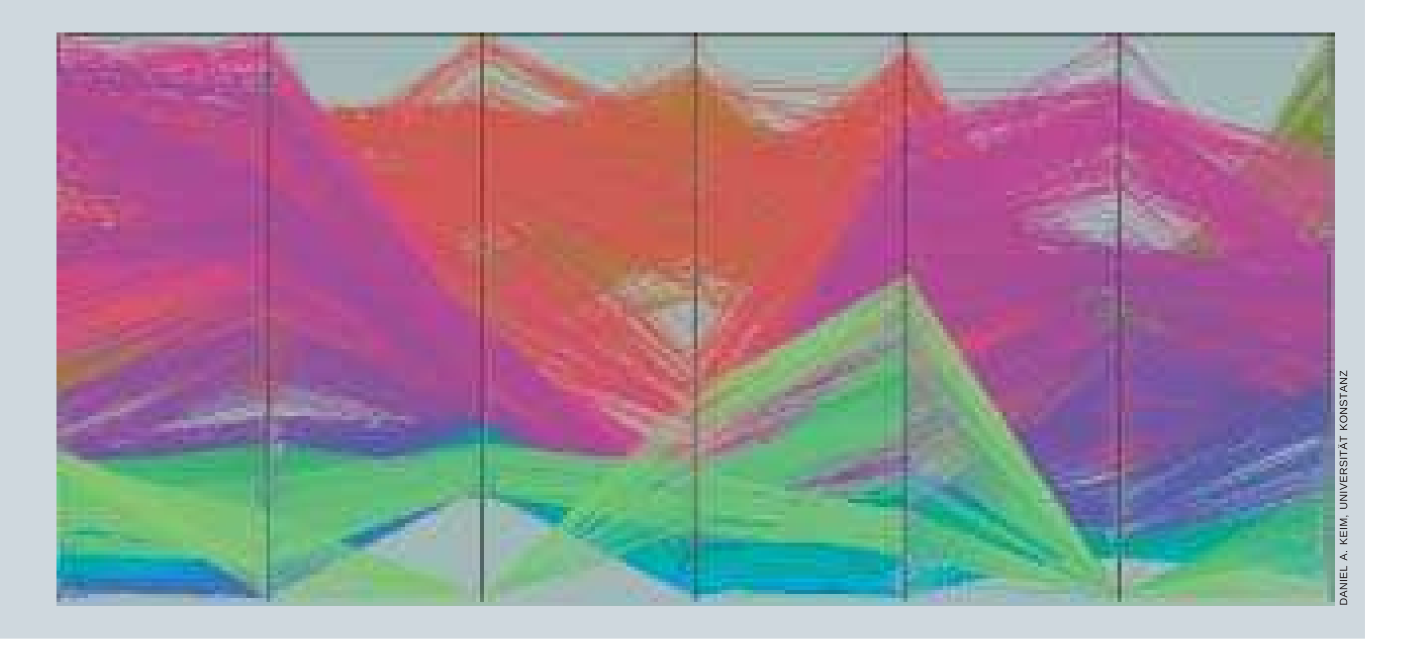
Früher Erfolg des Data Mining: die Kepler'schen Gesetze

Das ist ein klassisches Beispiel für *Data Mining* („Daten schürfen"): Es geht darum, aus großen Datenmengen allgemeine Gesetzmäßigkeiten zu extrahieren, ohne vorher zu wissen, welcher Art diese Gesetzmäßigkeiten sein könnten. Wenn am Ende die so gewonnene, konzentrierte Information die gesamte Datensammlung schlicht erübrigt – aus Keplers Gesetzen kann man Brahes Daten einfach ausrechnen – und auch noch verlässliche Prognosen ermöglicht, dann hat *Data Mining* den größten überhaupt denkbaren Erfolg erzielt.

Anders als zur Zeit Brahes und Keplers sind große Datenmengen heute leicht zu erhalten. In praktisch jedem Unternehmen zeichnen Computer jedes Einzelereignis aus der Produktion, dem Vertrieb, der Lagerhaltung oder dem Personalwesen gewissenhaft auf. Sie geben auch ohne weiteres Antworten auf gezielte Fragen („Was hat Kunde X beim letzten Mal bestellt, und wann?", „Wie hoch war im Jahr 2000 der durchschnittliche Monatsumsatz im Raum Frankfurt?"), allgemeinere Muster, Strukturen, Regelmäßigkeiten bleiben dagegen meist unbemerkt. Aber gerade diese Muster lassen sich oft nutzen. Findet man etwa in einem Supermarkt heraus, dass bestimmte Produkte häufig zusammen gekauft werden, so lässt sich der Umsatz vielleicht noch steigern, indem man beide Produkte in benachbarte Regale stellt.

Wie können solche Regelmäßigkeiten gefunden werden? Angesichts der heutigen Datenflut ist mit intensivem Nachdenken und schriftlichem Rechnen nach dem Vorbild Keplers wenig auszurichten. Wir sind auf die Hilfe von Computern angewiesen. „Intelligente" Verfahren zur Datenanalyse zu entwickeln ist daher die Hauptaufgabe des noch jungen Forschungsgebiets „Wissensentdeckung in Datenbanken" (*Knowledge Discovery in Databases*, KDD), das kurz auch „Data Mining" genannt wird.

Wesentliche Prinzipien sind schon in anderen Forschungsrichtungen ausgearbeitet worden. Die klassische Statistik hat die Datenanalyse zur hohen Kunst entwickelt; die Forschungsrichtung Künstliche Intelligenz stellt zum Lernen aus Beispielen verschiedene maschinelle Verfahren bereit: künstliche neuronale Netze, Fuzzy-Systeme, genetische Algorithmen. Der wesentlich neue Aspekt von



Punkte im siebendimensionalen Raum entziehen sich der Vorstellungskraft. Eine Darstellung durch „parallele Koordinaten“ (siehe den Beitrag von Daniel Keim auf Seite 88) visualisiert das Unvorstellbare und hilft so, Gesetzmäßigkeiten zu entdecken.

KDD liegt in der Verknüpfung bekannter Verfahren und ihrer Anpassung auf große Datenmengen.

Im Laufe der Zeit haben sich typische Aufgaben herauskristallisiert, die Data-Mining-Verfahren lösen können sollten. Zu diesen gehören vor allem

- Klassifikation: Ist dieser Kunde kreditwürdig oder nicht?
- Konzeptbeschreibung: Welche Eigenschaften haben reparaturanfällige Fahrzeuge?
- Segmentierung: Wie lassen sich meine Kunden in aussagekräftiger Weise in Untergruppen einteilen?
- Prognose: Wie wird sich der Dollarkurs entwickeln?
- Abhängigkeitsanalyse: Welche Produkte werden häufig zusammen gekauft?
- Abweichungsanalyse: Gibt es jahreszeitliche Umsatzschwankungen?

Am häufigsten sind Klassifikations- und Prognoseprobleme, da ihre Lösung sich unmittelbar auf den Umsatz und den Gewinn eines Unternehmens auswirken kann. Aber auch Abhängigkeitsanalysen werden sehr oft benötigt, zum Beispiel wenn Verbundkäufe ausgewertet (Warenkorbanalyse) oder Ursachen für Fehler in technischen Geräten gesucht werden.

Einige Verfahren zur Lösung der genannten Aufgaben werden in den folgenden Beiträgen näher beschrieben.

Im Allgemeinen liegen in einem Unternehmen die Daten nicht so vor, dass diese Verfahren unmittelbar angewandt werden könnten. Vielmehr müssen sie zunächst aufbereitet werden, was in der Regel sechzig bis neunzig Prozent des Gesamtaufwandes ausmacht. Dazu gehört etwa die Auswahl aussichtsreicher Datensätze und die Vereinheitlichung des Datenformats, vor allem wenn Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt werden. Dann sind die Daten von Fehlern und Ausreißern zu säubern. Wenn die Datenmenge zu groß ist, empfiehlt es sich, sie zu reduzieren, indem man Stichproben zieht, Teile jedes Datensatzes ignoriert oder Datensätze zu Gruppen gleicher Eigenschaften zusammenfasst.

Nachdem auf die so vorverarbeiteten Daten Data-Mining-Verfahren angewandt wurden, müssen die Ergebnisse interpretiert, geprüft und bewertet werden. Denn obwohl die meisten Verfahren eine saubere theoretische Grundlage haben und sich Computer bei der Datenauswertung natürlich nicht verrechnen, sind die Ergebnisse nur als Hypothesen anzusehen, deren Korrektheit noch zu prüfen und deren Bedeutung noch von menschlichen Experten zu bewerten ist.





Rudolf Kruse *(oben) und* ***Christian Borgelt*** *haben verschiedene Verfahren im Bereich der Intelligenten Datenanalyse entwickelt. Rudolf Kruse promovierte und habilitierte sich an der Technischen Universität Braunschweig mit Arbeiten über Fuzzy-Datenanalyse. Seit 1996 ist er Professor für praktische Informatik an der Universität Magdeburg. Christian Borgelt studierte Informatik und Physik an der Technischen Universität Braunschweig und promovierte 2000 mit einer Arbeit zum Thema des folgenden Artikels an der Universität Magdeburg.*

So liegt vielen Verfahren die Annahme zu Grunde, dass die auszuwertenden Daten eine Zufallsstichprobe sind. Dies ist jedoch fast nie der Fall. Die Daten wurden in der Regel zu anderen Zwecken gesammelt und geben daher die tatsächlichen Verhältnisse verzerrt wieder, was auf die Ergebnisse durchschlägt.

Ein automatisches Verfahren kann auch die Relevanz eines Ergebnisses nur schwer einschätzen. So wird ein Data-Mining-Verfahren aus Krankenhausdaten unweigerlich den statistisch bestens gestützten Schluss ziehen: „Alle schwangeren Patienten sind weiblich.“ Dem menschlichen Experten bleibt es überlassen, aus den Aussagen des Systems diejenigen herauszufiltern, die man sich nicht unbedingt vorher denken konnte.

Schließlich können selbst mit den schnellsten Rechnern nicht alle denkbaren Hypothesen getestet werden. Zwangsläufig beschränken sich die Systeme auf Fragen, die auf Grund gewisser plausibler Kriterien („Heuristiken“) aussichtsreich erscheinen. Dabei kann eine eigentlich interessante Antwort untergehen, weil die zugehörige Frage nicht gestellt wurde.

Unter Umständen ist der gesamte Wissensentdeckungsprozess aus Datenaufbereitung, Aufgabendefinition, Anwendung der Verfahren, Prüfung und Interpretation der Ergebnisse mehrmals zu wiederholen. Vielleicht gewinnt man ja doch noch neue Erkenntnisse, wenn man mehr oder andere Daten einbezieht, andere Teile jedes Datensatzes berücksichtigt oder ein anderes Verfahren anwendet. Neben der Verbesserung der Verfahren selbst ist es daher ein vorrangiges Forschungsziel, diesen Probierprozess durch geeignete Software zu unterstützen und (teilweise) zu automatisieren. ■

Unsicheres Wissen nutzen

Probabilistische Schlussfolgerungsnetze sind ein probates Mittel, unsicheres Wissen sauber und mathematisch fundiert zu verarbeiten. In neuerer Zeit wurden Verfahren entwickelt, um sie automatisch aus Beispieldaten zu erlernen.

Von Christian Borgelt und Rudolf Kruse

Ein hoher Blutdruckwert allein sagt noch nicht viel, ein hoher Pulswert mag ganz banale Ursachen haben, die Gesichtsfarbe des Patienten ist nicht objektiv einzuschätzen, viele diagnostische Verfahren sind ungenau – aber der Arzt stellt regelmäßig aus der Gesamtheit der Befunde die richtige Diagnose.

Wie ein Experte aus derart unsicheren Daten Schlussfolgerungen zieht, ist nur sehr schwer in einem Algorithmus zu formalisieren. Dem Computer angemessen und Grundlage seines Funktionierens ist die klassische zweiwertige Logik. Die aber unterscheidet nur zwischen wahr und falsch und kann folglich mit nur wahrscheinlich wahren Aussagen und Regeln nicht umgehen. Es hilft daher wenig, dass für das Schlussfolgern mit klassischer Logik sehr leistungsfähige Programme zur Verfügung stehen.

Der Geistliche Thomas Bayes: Vordenker moderner Schlussfolgerungssoftware

Wie wäre ein solches Programm auf die Verarbeitung unsicheren und vagen Wissens zu erweitern? Zur Modellierung von vagem Wissen mit Begriffsunschärfen (wieviel ist ein hoher Pulswert?) haben sich Methoden der Fuzzy Logic (Spektrum der Wissenschaft 06/1995, S. 34) bewährt. Komplizierter wird es, wenn unsicheres Wissen in Form von Schlussregeln vorliegt: „Wenn der Rasen nass ist, dann hat es mit 90-prozentiger Sicherheit geregnet.“ Derartige Schlussfolgerungen sind stark vom Kontext abhängig: Der Sicherheitsfaktor 90 Prozent sinkt dramatisch, sowie ich erfahre, dass es einen Rasensprenger gibt.

Um derartige (und kompliziertere) Abhängigkeiten angemessen wiederzugeben, konstruiert man so genannte Schlussfolgerungsnetze. Das sind abstrakte Graphen, deren Knoten aus Variablen bestehen und deren Kanten den Abhängigkeiten zwischen diesen Variablen entsprechen.

So enthält ein Schlussfolgerungsnetz für medizinische Zwecke Knoten für Eigenschaften des Patienten wie Alter, Geschlecht und Gewicht, für Symptome wie Fieber, Blutdruck und Schmerzen sowie für verschiedene Krankheiten. Die Kanten geben dann explizit an, welche Krankheiten mit welcher Wahrscheinlichkeit welche Symptome hervorrufen, wodurch die oben angedeuteten Probleme vermieden werden.

Die bekanntesten Netztypen sind

- Markow-Netze, nach dem russischen Mathematiker Andrej Andrejewitsch Markow (1856–1922), der wesentliche Beiträge zur Beschreibung von Zufallsprozessen mithilfe der nach ihm benannten Markow-Ketten leistete, und
- Bayes-Netze, nach dem englischen Geistlichen Thomas Bayes (1702–1761), der in einem posthum veröffentlichten Aufsatz eine noch unvollständige Formulierung des nach ihm benannten Bayes'schen Satzes gab.

Während in Markow-Netzen die Kanten ungerichtet sind, haben sie in Bayes-Netzen eine definierte Richtung (von Ursache nach Wirkung). Mit dem Bayes'schen Satz kann man einen Schluss von der Ursache auf die Wirkung in einen Schluss in umgekehrter Richtung umrechnen und somit Schlussfolgerungen auch gegen die Richtung einer Kante ziehen.

Als Beispiel betrachten wir einen Abstammungstest, der in deutlich komplexerer Form bei dänischen Rindern durchgeführt wird. Es soll nachgeprüft werden, ob ein Kalb tatsächlich die Eltern hat, die der Züchter angibt; denn da für ein Kalb je nach Stammbaum mehr oder weniger hohe Preise zu erzielen sind, besteht ein gewisser Anreiz für die Züchter, falsche Elterntiere anzugeben.

Vom Kalb und von den vom Züchter angegebenen Elterntieren werden Blutproben genommen und fotometrisch untersucht. Je Blutprobe werden vier Werte gemessen (die Messgröße heißt „Lysis“, aber darauf kommt es hier nicht an), die indirekt Aufschluss über die genetische Ausstattung und damit über die Abstammungsbeziehung geben. Aus diesen zwölf Werten sind die Wahrscheinlichkeiten dafür abzuleiten, dass Vater und Mutter korrekt angegeben wurden.

Gesucht ist also die Funktion, die zu beliebigen zwölf Messwerten die beiden Wahrscheinlichkeiten angibt. Aber kein Experte könnte sie angeben und kein Computerprogramm sie aus Daten der Vergangenheit schätzen; zu unübersichtlich ist die Vielzahl der denkbaren Abhängigkeiten. Vielmehr müssen wir unser theoretisches Wissen in das Verfahren einbringen. Dazu sind zusätzliche Variable einzuführen, die man nicht beobachten kann, was zunächst das Problem noch zu verschärfen scheint; in Wirklichkeit wird es jedoch dadurch erst handhabbar, weil die gegenseitigen Abhängigkeiten und vor allem Unabhängigkeiten klar dargestellt werden können. Das wiederum erlaubt es uns, das große Problem in mehrere kleinere zu zerlegen.

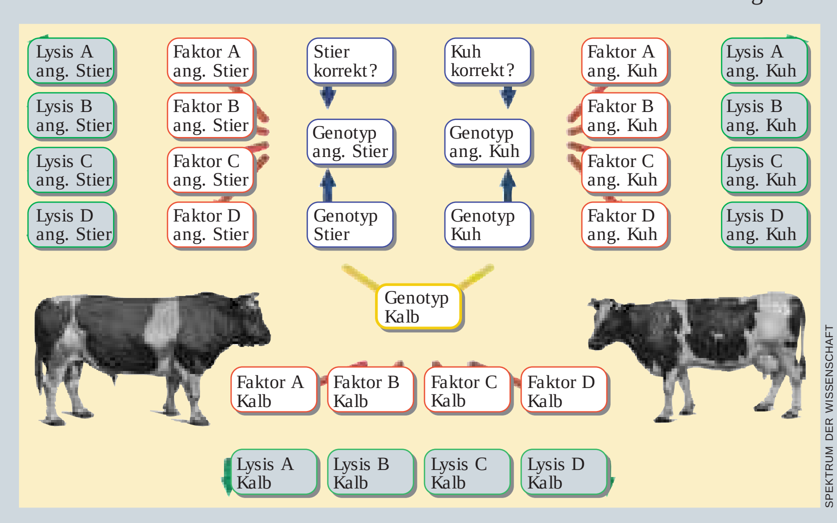
Das Netz der Abhängigkeitsstruktur (Kasten rechts) zeigt keine direkten Verbindungen zwischen den zwölf Eingangsgrößen (Lysis A bis D für Stier, Kuh und Kalb) und den zwei Ausgangsgrößen („Stier korrekt angegeben?“ und „Kuh korrekt angegeben?“). Gleichwohl ist die von den Eingangsgrößen bereitgestellte Information über die Verbindungen des Netzes übertragbar, und zwar sowohl in Pfeilrichtung als auch in Gegenrichtung, bis sie bei den Ausgangsknoten anlangt. Die Übertragung geschieht mit speziellen Berechnungsvorschriften, die wesentlich auf dem Bayes'schen Satz beruhen. Dabei werden auch indirekte Abhängigkeiten zwischen Variablen korrekt berücksichtigt. Das Endergebnis gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit Stier und Kuh korrekt angegeben wurden.

In diesem Beispiel gibt es zwischen zwei Knoten nur genau einen Pfad entlang der eingezeichneten Verbindungen. Es ist daher klar, auf welchem Wege die Informationen übertragen werden müssen. Dagegen kann zum Beispiel in einem Bayes-Netz, das der Überwachung von Patienten auf der Intensivstation dient, Information auf mehreren Wegen von einem Knoten zu einem anderen fließen. Manche Information bekommt dadurch fälschlich doppeltes Gewicht, was zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann. Eine Lösung des Problems besteht darin, das Netz durch geschicktes Verschmelzen von Knoten in eine gleichwertige, aber einfach verbundene Struktur zu überführen. Dafür stehen effiziente Algorithmen zur Verfügung.

Bayes'sche Netze sind heutzutage in der Industrie bereits sehr weit verbreitet. Bei der Volkswagen AG werden sie zur Eigenschafts- und Teilebedarfsplanung ►

Ein Bayes'sches Wahrscheinlichkeitsnetz

Ist dieser Stier der Vater?



Das Bild beschreibt die Abhängigkeitsstruktur der Variablen für den im Text erwähnten (idealisierten) Abstammungstest. Die direkt beobachtbaren Variablen sind grau unterlegt. Die Pfeile zeigen an, welche Größen auf welche anderen einen direkten Einfluss haben. Wichtiger als die vorhandenen Pfeile sind jedoch die fehlenden (im Prinzip könnte es ja zwischen jedem Paar von Variablen eine Verbindung geben). So hängen etwa die Lysiswerte des Kalbes von den Lysiswerten des Stieres ab, aber eben nur indirekt. Halten wir etwa den Genotyp – die nicht direkt beobachtbare genetische Ausstattung – des Kalbes fest, so verschwindet diese Abhängigkeit. Man sagt, die Lysiswerte des Stieres seien von den Lysiswerten des Kalbes „bedingt unabhängig gegeben der Genotyp des Kalbes". Gerade diese bedingten Unabhängigkeiten erlauben die Zerlegung des Problems in mehrere kleine Teilprobleme.

Man muss sich jetzt nämlich nur noch überlegen, „wie die Pfeile wirken". Ein Beispiel: Die gelben Pfeile beschreiben die Mendel'sche Regel (nach dem österreichischen Mönch und Botaniker Johann Gregor Mendel, 1822–1884, der die Grundgesetze der Vererbung formulierte), nach welcher der Genotyp des Kalbes von den Genotypen des Stieres und der Kuh abhängt. Wenn wir also über den Genotyp des Stieres eine durch Wahrscheinlichkeiten ausgedrückte unvollständige Kenntnis haben („mit Wahrscheinlichkeit 0,3 ist er vom Genotyp *aa*, mit Wahrscheinlichkeit 0,7 von dem Genotyp *ab*"), ebenso von der Kuh, dann ergibt sich daraus mit den, auch durch Wahrscheinlichkeiten ausgedrückten, Mendel'schen Regeln (siehe nebenstehende Tabelle) eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Genotyp des Kalbes. Damit haben wir unsere unvollständige Information über Stier und Kuh in (unvollständige) Information über den Genotyp des Kalbes übertragen. Diese Übertragung funktioniert auch gegen die Pfeilrichtung: Ein Kalb mit Genotyp *bb* kann keine reinerbigen *aa*-Eltern haben, und andere Kombinationen der elterlichen Genotypen sind zumindest unwahrscheinlich.

Genotyp Stier	Genotyp Kuh	Genotyp Kalb *aa*	Genotyp Kalb *ab*	Genotyp Kalb *bb*
aa	*aa*	100	0	0
ab	*aa*	50	50	0
bb	*aa*	0	100	0
aa	*ab*	50	50	0
ab	*ab*	25	50	25
bb	*ab*	0	50	50
aa	*bb*	0	100	0
ab	*bb*	0	50	50
bb	*bb*	0	0	100

Abhängigkeit des Genotyps des Kalbes von den Genotypen des Stieres und der Kuh (Wahrscheinlichkeiten in Prozent)

Rote Pfeile beschreiben biologisches Wissen über Gen-Ausprägungen, wobei auch Wissen darüber eingeht, welche Allele dominant und welche rezessiv sind. Ein Beispiel einer solchen Abhängigkeit ist in der Tabelle unten gezeigt. Der Blutfaktor *A*, dessen Vorliegen mit dem Messen des Lysiswertes *A* festgestellt wird, wird von dem rezessiven Allel *a* hervorgerufen und ist daher gewöhnlich nur beim Genotyp *aa* anzutreffen. In seltenen Fällen kann es aber auch beim Genotyp *ab* zur Ausprägung dieses Faktors kommen.

Grüne Pfeile beschreiben den fotometrischen Messprozess der Lysiswerte samt zugehörigen Messfehlern. Ihnen liegt eine Tabelle zu Grunde, welche die Wahrscheinlichkeiten dafür aufführt, dass ein vorhandener Blutfaktor durch das Messverfahren erkannt (hohe Lysiswerte) oder nicht erkannt wird (Lysiswert niedrig oder null).

Genotyp Kalb	Faktor *A* ja	Faktor *A* nein
aa	100	0
ab	3	97
bb	0	100

Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Faktors *A* in Abhängigkeit vom Genotyp (in Prozent)

Stier korrekt?	Genotyp Stier	Genotyp ang. Stier *aa*	Genotyp ang. Stier *ab*	Genotyp ang. Stier *bb*
ja	*aa*	100	0	0
ja	*ab*	0	100	0
ja	*bb*	0	0	100
nein	*aa*	11	57	32
nein	*ab*	11	57	32
nein	*bb*	11	57	32

Abhängigkeit des Genotyps des angegebenen Stiers vom Genotyp des tatsächlichen Vaters und davon, ob der Stier korrekt identifiziert wurde (Wahrscheinlichkeiten in Prozent)

Blaue Pfeile beschreiben, dass der Genotyp der vom Züchter angegebenen Elterntiere nur dann mit dem der tatsächlichen Elterntiere übereinstimmt, wenn diese korrekt angegeben wurden. Außerdem geht in diese Abhängigkeit Wissen über die Häufigkeit der Genotypen in der Rinderpopulation ein, denn wenn falsche Elterntiere angegeben wurden, entsprechen die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Genotypen unabhängig vom Genotyp des angegebenen Stieres dem Populationsdurchschnitt.

Auf diese Weise können alle Abhängigkeiten mit relativ wenigen Zahlenwerten für Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden. Die Bedingung, dass sich die Wahrscheinlichkeiten einer Verteilung zu 1 addieren müssen, und allgemeine Erwägungen wie etwa, dass die Abhängigkeit der Blutfaktoren vom Genotyp für alle drei untersuchten Tiere die gleiche ist, helfen, die Zahl der anzugebenden Daten weiter zu vermindern.

eingesetzt, bei dem Telekommunikationsunternehmen AT&T dienen sie zur Betrugserkennung. Microsoft bietet zur Unterstützung bei der Diagnose von Druckerproblemen ein Programm an, das auf einem Bayes'schen Netz beruht.

Nicht immer ist jedoch das zu modellierende System so einfach, dass ein Experte ohne weiteres ein Bayes-Netz aufstellen könnte. Wenn man aber über Datensätze von Beispielfällen aus der Vergangenheit verfügt, kann man versuchen, den Computer aus diesen Daten ein Schlussfolgerungsnetz lernen zu lassen.

Die einfachere Form dieses Lernens ist das quantitative oder Parameterlernen: Die Struktur des Netzes ist bekannt, etwa durch einen menschlichen Experten festgelegt worden. Es fehlen nur noch einige Wahrscheinlichkeitswerte in den Tabellen; die sind durch Rückgriff auf die Daten zu schätzen. Dafür hält die klassische Statistik, insbesondere die Schätztheorie, ein großes Methodenarsenal bereit. Die einzige Schwierigkeit besteht darin, dass die in der Praxis vorliegenden Datensätze oft unvollständig sind. Doch steht mit dem Expectation-Maximization-Algorithmus, der als eine Erweiterung der in der Statistik wohlbekannten Maximum-Likelihood-Schätzung gelten kann, eine Kompensationsmöglichkeit zur Verfügung.

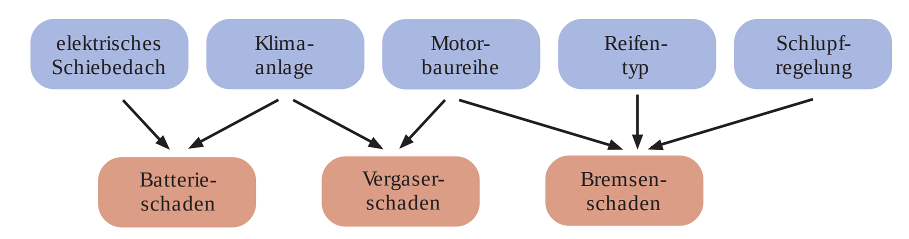
Interessanter ist das qualitative Lernen, bei dem man versucht, die Abhängigkeitsstruktur selbst aus den gegebenen Daten abzuleiten. Dazu gibt es im Wesentlichen drei Ansätze:

➤ Erstens: Man probiere verschiedene Netze durch, messe für jedes nach, wie gut es zu den Daten passt, und wähle dann das beste aus. Es gibt brauchbare Messmethoden für diese Passgenauigkeit, doch scheitert dieser Ansatz in der Praxis an der Vielzahl möglicher Netze.

➤ Zweitens: Man beginnt mit einem vollständig verbundenen Netz mit ungerichteten Verbindungen: Jeder Knoten ist mit jedem anderen verbunden. Stellt man eine bedingte Unabhängigkeit zwischen zwei Variablen fest, so entfernt man die Verbindung zwischen den Variablen, und das so oft, bis sich eine möglichst einfache Abhängigkeitsstruktur ergibt. Anschließend versieht man die übrig gebliebenen Verbindungen, ebenfalls auf der Grundlage festgestellter bedingter Unabhängigkeiten, mit Pfeilen. Für den Test auf bedingte Unabhängigkeit kann man den Shannon'schen Informationsgewinn zum Maßstab nehmen (nach Claude E. Shannon, 1916–2001) oder das in der Statistik wohl bekannte χ^2-(Chi-Quadrat-)Maß.

Allerdings sind die erforderlichen Tests recht aufwendig und nur bei sehr vielen verfügbaren Datensätzen hinreichend verlässlich. Außerdem ist die Abgrenzung zwischen „bedingt unabhängig" und dem Gegenteil schwierig (natürlich zeigen sich in realen Daten nie exakte mathematische Unabhängigkeiten); so kommen gelegentlich fehlerhafte Abhängigkeitsstrukturen zu Stande.

➤ Der dritte Ansatz beruht auf der nahe liegenden Idee, dass direkte Abhängigkeiten im Allgemeinen stärker sind als indirekte. Indem man die Stärke der Abhängigkeit zwischen Variablen bestimmt – auch hier können wieder der Shannon'sche Informationsgewinn und das χ^2-Maß zum Einsatz kommen –, kann man die Verbindungen auswählen, die wahrscheinlich in einer Abhängigkeitsstruktur vorhanden sind. So versucht man die Vorgänger einer Variablen in der zu bestimmenden Abhängigkeitsstruktur zu finden, indem man schrittweise die Variablen auswählt, von denen sie am stärksten abhängt.



Ausschnitt eines fiktiven Netzes der Abhängigkeiten von Schäden (untere Reihe) von Fahrzeugmerkmalen (obere Reihe). Ein Data-Mining-System würde ein solches Netz aus Daten wie den nebenstehenden erlernen.

Häufigkeit von Batterieschäden (Prozent)		Klimaanlage mit	Klimaanlage ohne
elektrisches Schiebedach	mit	9	3
	ohne	3	2

Allerdings ist allein durch ein statistisches Maß nicht entscheidbar, ob man eine Variable zum Vorgänger oder Nachfolger einer anderen erklären sollte. Man muss daher die Pfeilrichtungen durch andere Kriterien festlegen. Außerdem findet das Verfahren nur dann mit Sicherheit das beste Netz, wenn dieses ein Baum ist, es also von jedem Knoten zu jedem anderen nur genau einen Pfad gibt (wie in dem oben betrachteten Abstammungstest).

In allen beschriebenen Ansätzen geht man davon aus, dass zumindest die Menge der Variablen bekannt ist. Bisher gibt es nur relativ wenige Ansätze, zu gegebenen Daten vermittelnde Variablen automatisch „hinzuzuerfinden", so wie wir im Beispiel der Abstammungsprüfung zusätzliche Variablen eingeführt haben.

Trotz der angedeuteten Probleme sind sowohl der zweite als auch der dritte Ansatz praxistauglich und inzwischen in recht ausgereiften Implementierungen verfügbar.

In einer Anwendung aus unserer eigenen Forschung geht es um die Fehlerdiagnose bei Mercedes-Fahrzeugen. Da die echten Ergebnisse vertraulich sind, geben wir ein fiktives Beispiel. Gesucht sind Abhängigkeiten zwischen den Ausstattungsmerkmalen eines Fahrzeugs (Motor- und Getriebebaureihe, Reifentyp, Sonderausstattungen und so weiter) und aufgetretenen Schäden. Durch Messen der Abhängigkeitsstärke zwischen entsprechenden Variablen kann so ein zweischichtiges Netz gelernt werden. Ein Beispiel für ein mögliches Lernergebnis zeigt das Bild links oben. Bei einem solchen Ergebnis wäre zu vermuten, dass Klimaanlage und elektrisches Schiebedach zusammen die Batterie zu stark belasten; durch eine stärkere Batterie, wenn beide Sonderausstattungen gewählt werden, wäre Abhilfe zu schaffen.

Allgemein sind Lernverfahren für Bayes'sche Netze immer dann einsetzbar, wenn es um die Analyse von Abhängigkeiten zwischen einer großen Anzahl von Variablen geht. Ziel einer solchen Analyse ist ein Schlussfolgerungssystem, das anschließend für Vorhersagen über den Wert bestimmter Variablen dient. Aber schon die Struktur des Netzes allein kann wertvolle Aufschlüsse geben, wie die beschriebene Anwendung bei Mercedes-Benz zeigt. ■

Literaturhinweise

Unsicheres und vages Wissen. Von Christian Borgelt, Heiko Timm und Rudolf Kruse in: Handbuch der Künstlichen Intelligenz. Von G. Görz et al. (Hg.). Oldenbourg, München 2000, S. 291

Graphical Models – Methods for Data Analysis and Mining. Von Christian Borgelt und Rudolf Kruse. J. Wiley & Sons, Chichester 2002.

Bayesian Networks and Decision Graphs. Von Finn V. Jensen. Springer, New York 2001.

*Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis"*

Lern- und Entdeckungsverfahren

Betrügerische Kreditkartenkäufe, besonders fähige Basketballspieler und umweltbewusste Saftkäufer ausfindig machen – Data-Mining-Verfahren lernen selbstständig das Wesentliche.

Von Stefan Wrobel

Stellen Sie sich vor, Sie sind in einem Kreditkartenunternehmen für die Betrugsbekämpfung zuständig. Jedes Mal, wenn für eine der ausgegebenen Karten ein Zahlungsvorgang gebucht wird (eine „Transaktion"), werden Ihnen die Daten übermittelt. Wenn Ihnen die Transaktion verdächtig erscheint, können Sie eine Detailprüfung anordnen und damit möglicherweise eine Betrugsserie im Keim ersticken. Aber die Prüfung ist teuer und aufwendig, sollte also so sparsam wie möglich angewendet werden.

Woran erkennen Sie also möglichst trennscharf eine verdächtige Transaktion? Offensichtlich können Sie nicht lange über jeden Einzelfall nachdenken, sondern benötigen eine einfache Entscheidungsvorschrift: ein „Modell" oder eine „Hypothese" im Jargon des Data Mining. Nehmen wir weiter an, es gebe weder Literatur, in der geeignete Modelle zu finden wären, noch einen Experten, den Sie fragen können. Immerhin hat Ihre Firma in den letzten zwei Jahren ihres Bestehens alle Transaktions- und Kundendaten gesammelt und bei jeder Transaktion vermerkt, ob sie sich schlussendlich als betrügerisch herausgestellt hat oder nicht.

Dann befinden Sie sich in der gleichen Situation wie ein Lernverfahren für das Data Mining. Ein solches Computerprogramm soll allgemein eine Klassifikations- oder Vorhersageaufgabe lösen. Das muss nicht eine einfache Ja-Nein-Entscheidung sein wie in unserem Fall. In manchen Fällen gibt es mehr als zwei mögliche Antworten, etwa wenn aus dem Text einer E-Mail zu erschließen ist, an welche Abteilung der Empfängerfirma sie weiterzuleiten ist. Oder die Antwort ist ein Zahlenwert wie der zukünftig zu erwartende Umsatz eines Kunden.

Das Programm erhält nun eine große Menge von Beispielen für die Lösung der Aufgabe und soll daraus ein Modell für zukünftige Fälle erzeugen. Weil man diese Entscheidungsvorschrift auch als Funktion im mathematischen Sinne ansehen kann, die zu jeder denkbaren Situations- oder Objektbeschreibung eine eindeutige Entscheidung oder Vorhersage liefert, nennt man diese Aufgabe auch „Funktionslernen aus Beispielen".

Nehmen wir der Einfachheit halber weiter an, der Datenbestand, an dem Sie lernen können, bestehe nur aus den 16 Einträgen in der Tabelle unten. Jeder dieser Datensätze enthält drei „Attribute": die Zahlungsart der betreffenden Transaktion (online oder offline), den Typ der verwendeten Karte (standard, premium oder temporär) und den Betrag, sowie die aus der Erfahrung gewonnene Klassifizierung der Transaktion (Betrug oder OK). In der Realität können solche Beispieltabellen einige hundert Attribute haben und mehrere Millionen bis Milliarden von Einträgen umfassen; darüber hinaus liegen die Daten oft nicht als einheitliche Tabelle vor, sondern sind aus mehreren Tabellen unterschiedlicher Art zusammenzutragen.

Wenn Ihnen jetzt eine Transaktion mit den Attributwerten (online, premium, 1020) vorgelegt wird, dann ist es eine nahe liegende Idee, sich am nahe Liegenden zu orientieren, das heißt an Beispielen aus der Vergangenheit, die dem neuen Fall möglichst ähnlich sind. Sie würden also die Tabelle durchgehen und bei Beispiel 12 fündig werden: Zahlungsart und Kartentyp sind gleich, und beim Betrag gibt es nur geringfügige Unterschiede. Nach diesem Vorbild würden Sie vermutlich eine Prüfung anordnen.

Nr.	Zahlungsart	Kartentyp	Betrag	Klasse
1	offline	standard	700	Betrug
2	online	premium	800	OK
3	offline	premium	700	Betrug
4	online	temporär	500	OK
5	offline	premium	800	OK
6	offline	premium	600	Betrug
7	offline	premium	1100	OK
8	offline	premium	900	OK
9	offline	temporär	900	Betrug
10	offline	temporär	800	Betrug
11	online	standard	700	OK
12	online	premium	1000	Betrug
13	offline	standard	600	Betrug
14	online	temporär	700	OK
15	offline	standard	300	OK
16	offline	standard	400	Betrug

Fiktive Beispieldaten für Kreditkarten-Transaktionen

Aus diesem einfachen Prinzip hat sich eine Klasse von Lernverfahren entwickelt, die als „Nächste-Nachbarn-Verfahren" bezeichnet werden: Man ordne die zu betrachtenden Objekte in einen abstrakten Raum ein, derart dass ähnliche Objekte auch nahe beieinander zu liegen kommen. Zu dem zu klassifizierenden Objekt suche man in diesem abstrakten Raum den nächsten Nachbarn und verwende dessen Klassifizierung.

Für zahlenwertige Attribute ist „Nähe" beziehungsweise „Abstand" im Sinne der klassischen Geometrie zu verstehen: Man betrachtet die Zahlenwerte als Koordinaten eines Punktes in einem mehrdimensionalen Raum und berechnet den („euklidischen") Abstand zweier Punkte nach einer Standardformel, die auf den Satz des Pythagoras zurückgeht. Für Attribute, die nicht durch Zahlen auszudrücken sind, muss man geeignete Abstandsfunktionen definieren. So könnte man festlegen, dass der Abstand zwischen identischen Werten 0 und der Abstand zwischen unterschiedlichen Werten 1 sein soll. Dann ist noch durch geeignete Wahl der Maßeinheiten jedem Attribut ein angemessenes Gewicht im Vergleich zu den anderen Attributen zuzuweisen: Ist der Unterschied zwischen einer Standard- und einer Premium-Karte ungefähr so bemerkenswert wie ein Betragsunterschied von 500 Euro?

Mehrere nächste Nachbarn sind ein besserer Ratgeber als einer. Um eine Entscheidung zu treffen, dürfen die k nächsten Nachbarn „abstimmen", wobei das Stimmgewicht jedes Nachbarn umgekehrt proportional zu seinem Abstand ist: Je weiter entfernt ein Nachbar ist, desto weniger hat er zu sagen. Es wird dann diejenige Vorhersage getroffen, die unter Berücksichtigung der Gewichte die meisten Stimmen erhalten hat; für numerische Vorhersagen verwendet man das gewichtete arithmetische Mittel. Die Anzahl k der einzubeziehenden Nachbarn ist ein vom Benutzer vorzugebender Parameter.

Mit einer geschickt definierten Abstandsfunktion sind diese k-nächste-Nachbarn-Verfahren sehr leistungsfähig. Auf diese Weise haben wir gemeinsam mit Mathias Kirsten und Tamás Horváth von der Universität Bremen ein Verfahren entwickelt, das sehr erfolgreich chemische Moleküle bestimmten Klassen zuordnet und auch Typen von mRNA-Signalstrukturen mit hoher Sicherheit erkennt.

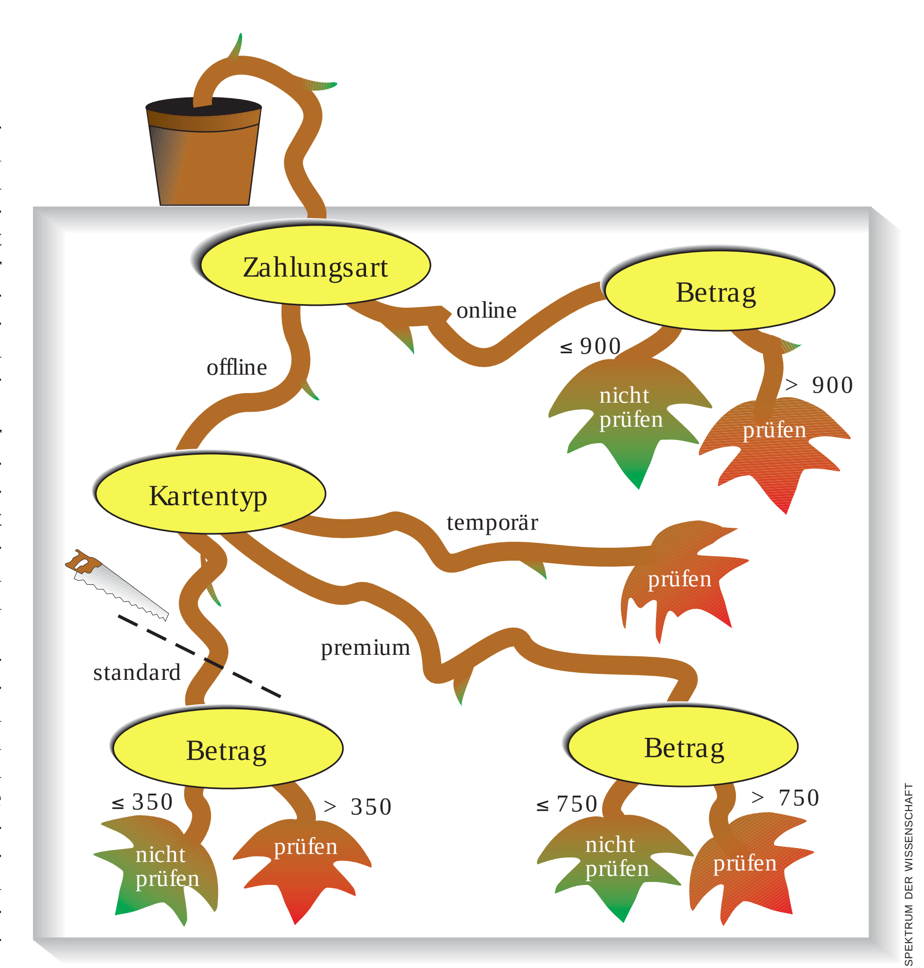
Leider muss man bei einem k-nächste-Nachbarn-Verfahren zur Klassifikation eines neuen Objektes sämtliche Beispiele aus der Vergangenheit zur Verfü- ▶

gung haben. Bei Millionen oder Milliarden von Beispielen kostet das sehr viel Speicherplatz und Suchzeit. Das kann in gewissen Grenzen mit intelligenten Speicher- und Suchstrategien kompensiert werden. Ein weiterer Nachteil dieser Verfahren bleibt jedoch bestehen: Sie liefern keine kompakte Entscheidungsvorschrift, die sich ein Mensch ansehen und auch nur gedanklich nachvollziehen, geschweige denn überprüfen könnte.

In der Praxis nutzt man daher unter anderem die so genannten Entscheidungsbaumverfahren. Sie sind nicht darauf angewiesen, alle Beispiele dauerhaft zu speichern, sondern erzeugen aus ihnen eine kompakte Vorschrift in Form eines Entscheidungsbaumes (siehe Bild rechts).

Die Vorschrift ist einfach anzuwenden. Zur Klassifikation eines neuen Objektes durchläuft man den Baum von oben nach unten. Jede „Astgabel" (oval in der Abbildung) stellt eine Frage nach einem der Attribute und verweist einen je nach der Antwort auf einen von mehreren Ästen. Dem folgt man bis zur nächsten Astgabel und so weiter, bis man am Ende (in einem der „Blätter") eine Entscheidung vorfindet. Bei unserer Überprüfung würde eine Transaktion mit den Attributwerten (online, premium, 1020) nach Durchlaufen nur zweier Astgabeln (und Wahl des jeweils rechten Astes) bereits als verdächtig klassifiziert.

Wie kann man nun einen solchen Entscheidungsbaum aus Beispielen erstellen? Wir lassen ihn aus einem zarten Pflänzchen heranwachsen. Das Urbäumchen hat nur eine Astgabel, an der zwei Blätter hängen; aber wir haben die Freiheit, in die Astgabel eine beliebige Frage hinein zu schreiben, an die Äste die möglichen Antworten und an die Blätter Entscheidungen. Diese Freiheit nutzen wir so, dass dieser rudimentäre Baum, angewandt auf die Beispielmenge, möglichst wenig falsche (und entsprechend möglichst viele richtige) Entscheidungen trifft. Dazu probieren wir sämtliche Attribute durch.



Dieser Entscheidungsbaum für das Kreditkartenproblem wächst, wie bei mathematischen Bäumen üblich, vom obersten Punkt (der „Wurzel") nach unten. Ein gestutzter Baum hätte zum Beispiel anstelle der ganz linken Astgabel „Betrag" das Blatt „prüfen".

In unserem Kreditkartenproblem ergibt sich: Schreiben wir das Attribut „Zahlungsart" in die Astgabel, kommen wir auf fünf falsche unter 16 Entscheidungen, wenn wir den Ast „offline" mit dem Blatt „prüfen" und den Ast „online" mit dem Blatt „nicht prüfen" versehen. Mit dem Attribut „Kartentyp" kommen wir („prüfen" bei „Standard", „nicht prüfen" sonst) auf sieben Fehler. Das Attribut „Betrag" ist zahlenwertig; in diesem Falle ist es zweckmäßig, einen gewissen Wert festzulegen und dann dem einen Ast alle Werte zuzuweisen, die über diesem „Schwellenwert" liegen, und dem anderen Ast alle darunter. In unserem Beispiel stellt sich 650 als der geeignetste Schwellenwert heraus; aber selbst damit macht unser Bäumchen noch sieben Fehler.

Also schreiben wir „Zahlungsart" in die Astgabel, weil das die wenigsten Fehlentscheidungen ergibt. Nun darf unser Bäumchen weiter wachsen, das heißt, jedes Blatt wird durch eine Astgabel mit Ästen und Blättern ersetzt. Wieder haben wir die Freiheit, die neu herangewachsenen Teile so mit Fragen, Antworten und Entscheidungen zu versehen, dass der Baum noch treffsicherer wird, das heißt, so wenig falsche Entscheidungen trifft wie möglich. Aber die Bezeichnung der alten Astgabeln und Äste ändern wir nicht. Für die neue Astgabel an den Ast „Zahlungsart offline" stehen nur noch die Beispiele mit dem Attributwert „Zahlungsart offline" zur Debatte, und noch einmal nach der Zahlungsart zu fragen macht keinen Sinn.

In weiteren Wachstumsschüben wird nun jedes Blatt, das überhaupt noch Fehler macht, durch eine Astgabel samt Zubehör ersetzt. Am Ende trifft der Baum auf der gesamten Beispielmenge die

Literaturhinweise

Kepler and Descartes. Von Stefan Wrobel et al. in: Handbook of Knowledge Discovery in Databases. Von Willi Klösgen und Jan Zytkow (Hg.). Oxford University Press, London 2002.

Relational Data Mining. Von Sašo Džeroski und Nada Lavrač (Hg.). Springer, Berlin 2001. Darin:
Distance-based Approaches to Relational Learning and Clustering, von Mathias Kirsten, Stefan Wrobel und Tamás Horváth, S. 213; und
Inductive Logic Programming for Knowledge Discovery in Databases, von Stefan Wrobel, S. 74.

Maschinelles Lernen und Data Mining. Von Stefan Wrobel et al. in: Handbuch der Künstlichen Intelligenz. Von G. Görz et al. (Hg.). Oldenbourg, München 2000, S. 517 .

Weblinks zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis"*

richtige Entscheidung, es sei denn, die Beispiele selbst wären widersprüchlich: Wenn von zwei Transaktionen mit den Attributen (offline, standard, 750) die eine sauber war und die andere nicht, kann man es nicht vollständig richtig machen. Der Baum im Bild links ist nach diesem Verfahren aus unserer Beispielmenge konstruiert.

Entscheidungsbaumverfahren sind sehr schnell und in der Praxis sehr erfolgreich. Sie unterscheiden sich nicht im Grundprinzip, sondern vor allem in den Kriterien, nach denen die Fragen in die Astgabeln eingesetzt werden. Unser Kriterium war sehr einfach: Minimiere die Summe der Fehler. Wesentlich bessere Ergebnisse liefert das Kriterium des Informationsgewinns: Stelle diejenige Frage, deren Antwort am meisten Information über das Objekt preisgibt oder, was auf dasselbe hinausläuft, am wenigsten von der für eine perfekte Entscheidung noch notwendigen Information im Dunkeln lässt. Dieses Prinzip lässt sich mithilfe der klassischen Informationstheorie quantifizieren.

Nun hat unser Entscheidungsverfahren so erfolgreich gelernt, dass es, angewandt auf die Beispieldaten, keine Fehler macht – aber darauf kommt es leider gar nicht an. Das Verfahren soll nicht die Trainingsdaten perfekt beherrschen, sondern in künftigen Entscheidungssituationen möglichst wenig Fehler machen. Das kann nicht gelingen, wenn das lernende Programm in der Schule andere Bei-spiele vorgesetzt bekommt als später im echten Leben. Es ist eine Kunst für sich, das Lernmaterial so auszuwählen, dass es die zu erwartende Realität repräsentativ wiedergibt.

Aber darüber hinaus sind die besten Schüler unter den Verfahren später nicht die besten Entscheider. Wer zu viel Wert auf zufällige Einzelheiten des Trainingsmaterials legt, kann später leicht in die Irre laufen. Ein Verfahren, das tausend verschiedene Modelle zur Auswahl hat, läuft – theoretisch nachweisbar – ein höheres Risiko, bei späterer Benutzung einen hohen Fehler zu produzieren, als eines, das überhaupt nur hundert Modelle in Erwägung ziehen kann.

Allzu große Empfindsamkeit ist also von Nachteil. Daher werden die Verfahren häufig abgestumpft. Entscheidungsbäume werden im Wortsinne gestutzt: Man schneidet einige der zuletzt nachgewachsenen Äste wieder ab. Das erhöht zunächst den Fehler auf der Trainingsmenge, kann aber gleichwohl nützlich sein. Um diese Nützlichkeit einzuschätzen und damit auch herauszufinden, welche Äste man stutzen soll, greift man zu einem Trick. Man lässt den Baum nur mit etwa siebzig Prozent des Beispielmaterials lernen. Dann schaut man nach, wie gut die hier oder da gestutzten Bäume auf den restlichen dreißig Prozent des Trainingsmaterials arbeiten, und wählt schließlich den, der sich am besten geschlagen hat. Diese dreißig Prozent dienen also als Ersatz für wirklich neues Material – zu Recht, denn der Baum hat sie beim Lernen nicht gesehen.

Diese Art der Modellselektion ist wahrlich nicht sehr tiefsinnig – man versucht das beste Verfahren mit der Axt zu finden. Aber es ist höchst erfolgreich:

Die besten Schüler sind nicht immer die besten Entscheider

Zwar gibt es für viele Zwecke bessere Lernverfahren, aber Entscheidungsbaumverfahren haben sich in der Praxis als ein De-facto-Standard durchgesetzt.

Vorhersagen machen Sinn für Dinge, die ihrer Natur nach einigermaßen vorhersehbar sind, wie etwa die Zahlungsfähigkeit eines Kreditnehmers oder der Umsatz einer Firma im nächsten Jahr. Gewisse Einzelereignisse vorherzusagen ist dagegen aussichtslos.

Vor einigen Jahren bekamen wir von einem Marktforschungsinstitut Daten darüber, welche Kunden in einer Reihe von Supermärkten welche Getränke in welchen Packungsgrößen, -arten und zu welchen Preisen gekauft hatten. Es wäre abwegig, aus solchen Daten vorherzusagen, welches Getränk ein einzelner Kunde kaufen wird, der soeben das Geschäft betreten hat. Dennoch können in den Daten interessante Gesetzmäßigkeiten stecken, die man gerne mit einem Data-Mining-Verfahren identifizieren möchte.

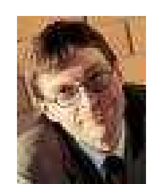
Wir ließen unser Verfahren Midos nach Gruppen von Kunden suchen, die sich beim Getränkekauf auffällig umweltfreundlich (Mehrwegflaschen) oder auffällig entgegengesetzt verhalten. Es gibt Millionen von Möglichkeiten, aus der Gesamtmenge der Kunden nach den in den Daten enthaltenen Attributen Untergruppen abzugrenzen. Nur zehn dieser Untergruppen beurteilte das Programm Midos, gestützt auf eine statistische Bewertungsfunktion, als hinreichend interessant und auffällig. Auf diese Weise stellt sich zum Beispiel heraus, dass Beamtenhaushalte, die nur einmal pro Woche einkaufen, eine auffällig hohe Mehrwegquote aufweisen. Dagegen entschieden sich weibliche Singlehaushalte auffallend selten für Mehrwegflaschen.

Wohlgemerkt: Das Kaufverhalten der weiblichen Singlehaushalte aus den Daten zu ermitteln ist keine Kunst, wenn man weiß, dass man danach fragen will – wohl aber, unter den Millionen denkbarer Untergruppen die der weiblichen Singles als interessant auszudeuten. Data Mining ist hier also eine Methode zur Erzeugung guter Vermutungen, die in einem weiteren Schritt näher untersucht werden können.

Hinter erfolgreichen Subgruppenentdeckungsverfahren wie Advanced Scout oder Midos stehen einerseits statistische Bewertungsfunktionen, andererseits ähnliche Algorithmen wie bei der strukturierten Suche nach Entscheidungsbäumen.

Eine weitere Klasse von Verfahren hat ihren Ursprung ebenfalls in der Analyse von Daten, wie sie an Supermarktkassen oder in Web-Shops entstehen (der „Warenkorbanalyse“). Diese so genannten Assoziationsregelverfahren entdecken, ob sich aus dem Kauf bestimmter Artikel mit einer gewünschten Sicherheit der Kauf bestimmter anderer Artikel schließen lässt. Ein Beispiel könnte sein: „Wer eine Fernsehzeitschrift und/oder eine Videokassette kauft, nimmt mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als zehn Prozent auch Erdnüsse mit.“ Man könnte also bei der Ladenplanung diese Artikel entsprechend platzieren.

Subgruppen-, Assoziations- und verwandte Verfahren sind nicht nur dadurch attraktiv, dass sie in Situationen, in denen vorhersagende Lernverfahren scheitern, noch Ergebnisse produzieren können, sondern sie eignen sich auch zum Einsatz bei sehr großen Datenbeständen. Da die Verfahren nicht ständig ein globales Modell optimieren müssen, können besonders effiziente Suchtechniken eingesetzt werden. Nutzt man zusätzlich Stichprobentechniken, so wird die Zeit, die man zur Entdeckung der interessantesten Subgruppen benötigt, sogar weitgehend unabhängig von der Größe des zu untersuchenden Datenbestandes. ■



Stefan Wrobel *ist Leitender Direktor am Fraunhofer-Institut für Autonome Intelligente Systeme in Sankt Augustin (Schwerpunkt: Wissensinformatik) und Professor für Praktische Informatik (Data Mining) an der Universität Bonn. Er ist Mitherausgeber einer der führenden Fachzeitschriften auf diesem Gebiet und gewähltes Mitglied des Gründungbeirats der International Machine Learning Society.*

Data Mining mit bloßem Auge

Visualisierung, die möglichst instruktive grafische Darstellung von Daten, ist wesentlicher Bestandteil des Data Mining.

Von Daniel A. Keim

Das menschliche Wahrnehmungssystem verfügt für Zwecke des Data Mining über bemerkenswerte Qualitäten. In einem Bild, das aus lauter kleinen Punkten (Pixeln) zusammengesetzt ist, erkennen wir mühelos großräumige Strukturen, auch wenn sie teilweise verdeckt, unscharf, unvollständig oder verzerrt sind. Nichts anderes tun wir, wenn wir ein Fernsehbild betrachten.

Die einzelnen Bildpunkte müssen nicht aus einer Fernsehkamera stammen. Die Farbe jedes einzelnen Pixels kann Ergebnis einer Berechnung sein, in die Millionen bis Milliarden von Einzeldaten eingegangen sind. Ein gutes Data-Mining-Verfahren macht aus einer ungeheuren Menge von Rohdaten die Farben der ungefähr eine Million Pixel, die ein größerer Computerbildschirm darstellen kann. Wenn man es geschickt anstellt, springt dann dem Betrachter des Bildschirms vielleicht eine Struktur ins Auge. Das kann durchaus eine Struktur sein, die der Data-Mining-Algorithmus gar nicht ausfindig gemacht hat. „Visuelles Data Mining" vereinigt also auf vorteilhafte Weise die enormen Speicherkapazitäten und Rechenleistungen moderner Computersysteme mit Fähigkeiten des Menschen, vor allem Flexibilität, Kreativität und Allgemeinverständnis.

Der Einsatz solcher Verfahren ist immer dann sinnvoll, wenn wenig über die Daten bekannt ist und man nicht genau weiß, wonach man sucht. Ein Mensch sieht – noch undeutlich – eine Struktur in den Daten, so wie das Programm sie ihm präsentiert, wählt eine andere Präsentationsform, die diese Struktur klarer zeigen soll, sieht daraufhin mehr Struktur, und so weiter. Dadurch stellt er Hypothesen über die Daten auf, die das Data-Mining-Programm im nächsten Datendurchlauf bestätigt – oder auch nicht. Da in der Regel viele Datendurchläufe erforderlich sind, muss die Interaktion des Benutzers mit der Maschine bequem und schnell gestaltet werden.

Visuelle Datenexploration ist also ein Prozess zur Erzeugung von Hypothesen. Im Verein mit automatischen Algorithmen aus den Bereichen Statistik und Künstliche Intelligenz ist sie zu einem unentbehrlichen Verfahren zur Exploration großer Datenbanken geworden. Durch die unmittelbare Rückkopplung über die bildliche Darstellung kommt der Benutzer ohne spezielle mathematische und statistische Kenntnisse aus.

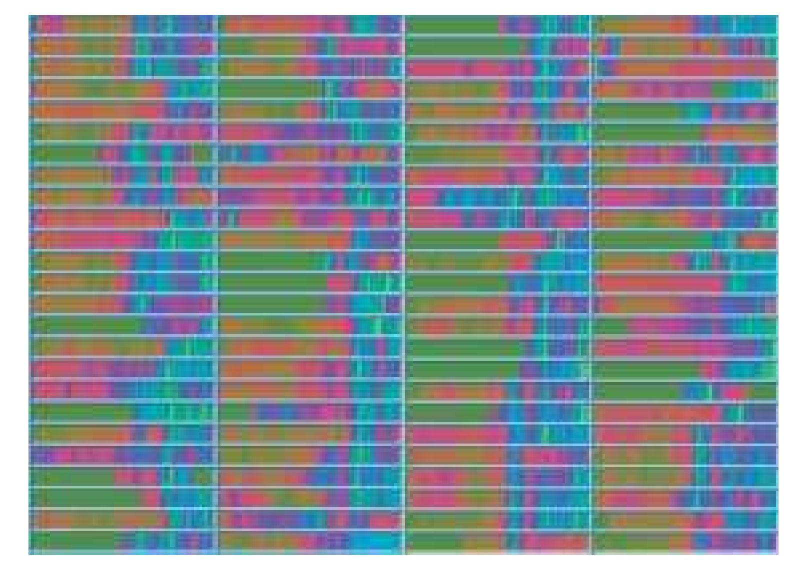
Wenn die darzustellenden Daten selbst aus ungefähr einer Million einzelner Zahlenwerte bestehen, liegt die Grundidee nahe: Jeder Datenwert bestimmt die Farbe genau eines Pixels. Im Einzelnen ist die Sache nicht so einfach. Die Tageskurse der hundert Aktien des FAZ-Index über die reichlich zwanzig Jahre von Januar 1974 bis April 1995 sind zwar ungefähr eine Million Zahlen, und die Wahl einer geeigneten Einfärbevorschrift ist nicht schwer: Man nehme helle Farben für hohe Kurse und dunkle Farben für niedrige. Aber wie ordnet man sie an, damit Strukturen erkennbar werden?

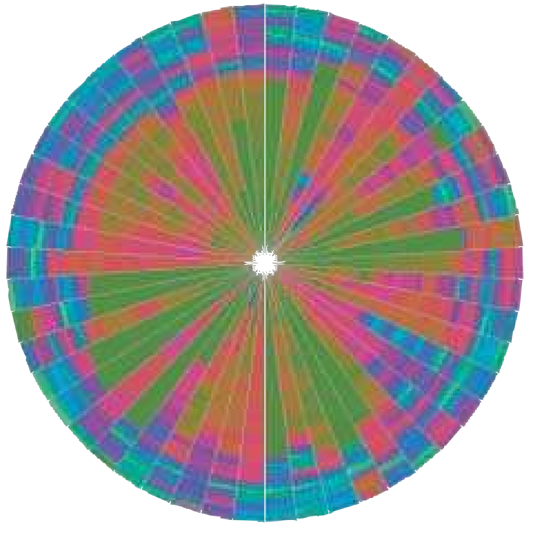
Die Daten legen eine Tabellenstruktur nahe: Jede Zeile entspricht einer Aktie, jede Spalte einem Tag, und jeder Tabelleneintrag besteht aus einem einzigen Pixel. Das ergibt einen wenig instruktiven schmalen Zeitstreifen, der sich über mehr als sieben Bildschirmbreiten zieht. Besser ist es, die Werte jedes Monats übereinander anzuordnen, die Spalten für jeden Monat nebeneinander, die (dann deutlich kürzeren) Zeitverläufe jeder Aktie übereinander und, wenn dann der Platz nicht reicht, Teilgruppen von Aktien-Zeitverläufen wieder nebeneinander (Bild unten, links).

Datenelemente werden also zu Teilgruppen zusammengefasst, jede Teilgruppe ist ein Element der nächsthöheren Stufe, und zusammengefasst wird abwechselnd zeilen- und spaltenweise. Dieses Verfahren, das aus kleinen Strukturen durch Wiederholung einer Aktion („rekursiv") immer größere aufbaut, hat den Namen *recursive pattern* erhalten.

Sein Vorteil ist, dass es den langen, unübersichtlichen Faden, der einer eindi-

Tageskurse der hundert Aktien des FAZ-Index von Januar 1974 bis April 1995, angeordnet in vier Spalten zu 25 Aktien (links). Innerhalb des Rechtecks, das zu einer Aktie gehört, sind die Pixel monatsweise in Pixelspalten angeordnet – insgesamt 243 Spalten mit je 22 Werten. Rechts dieselben Daten von fünfzig der hundert Aktien in Kreissektoren angeordnet. Die Zeit verläuft von innen nach außen.





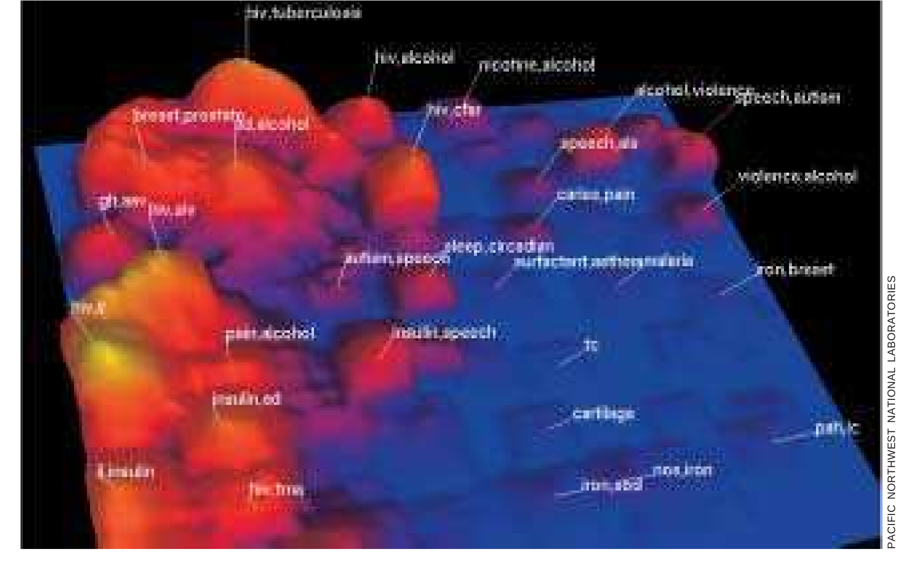
IEEE

mensionalen Datenreihe (den Kursen einer einzelnen Aktie) entspricht, zu einem breiteren, kürzeren Band verwebt, in dem der ursprüngliche Faden quer verläuft (die Weber würden es den Schussfaden nennen). Die optimale Lösung der Aufgabe, eine – beispielsweise – quadratische Fläche gleichmäßig mit einem Faden zu bedecken, wäre die berüchtigte, fraktale Peano-Kurve (Spektrum der Wissenschaft 03/1992, S. 72). Aber diese Anordnung verschafft dem Betrachter keinen klaren Überblick, obgleich benachbarte Datenpunkte benachbart bleiben (die Peano-Kurve ist stetig). Die Technik *recursive pattern* bietet eine gute Annäherung an das mathematische Ideal, ermöglicht aber ein besseres Verständnis der Daten.

Ihr Nachteil ist, dass Werte, die – in unserem Beispiel – zum gleichen Zeitpunkt gehören, über das Bildfeld verstreut und für das Auge kaum als eine Einheit wahrnehmbar sind. Besser ist es, die monatsweise zusammengefassten Zeitverläufe im Kreis statt unter- und nebeneinander anzuordnen (Bild links unten, rechts). In den Kreissektoren (diesmal für fünfzig statt hundert Aktien) verläuft die Zeit von innen nach außen. Hier sind Hochpreisphasen als helle kreisförmige Ringe auf den ersten Blick zu erkennen.

Noch instruktiver wäre es, wenn Aktien mit ähnlichen Verläufen auch nahe beieinander angeordnet würden. Dann würde auf den ersten Blick offensichtlich, wenn Teile des Aktienmarktes einem gemeinsamen Trend folgen und wie groß dieser Trend wäre. Dazu ist ein Maß für den „Abstand“ zweier Aktienverläufe zu definieren – je unähnlicher, desto größer der Abstand – und dann die Reihenfolge zu finden, welche die Summe der Abstände aufeinander folgender Verläufe minimiert. Das ist im Prinzip dasselbe wie das Problem des Handlungsreisenden (*travelling salesman problem*, SdW 04/1999, S. 76), der die Reihenfolge der Städte so wählen möchte, dass die Summe der Abstände aufeinander folgender Städte minimal wird. Da die exakte Lösung dieses Problems für große Anzahlen extrem aufwendig wird, begnügen sich die Visualisierungs-Algorithmen mit einer näherungsweisen Lösung.

Eine einfache Form der visuellen Datenexploration besteht darin, die Knoten eines Graphen so anzuordnen, dass seine Struktur auf den ersten Blick sichtbar wird. Schon für einen kleinen Graphen (Kasten rechts) ist dabei die Unterstützung durch den menschlichen Betrachter hilfreich; denn eine vollautomatische Analyse der Daten kann zwar die Knoten mit der höchsten Zahl an Kanten oder ▶



PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORIES

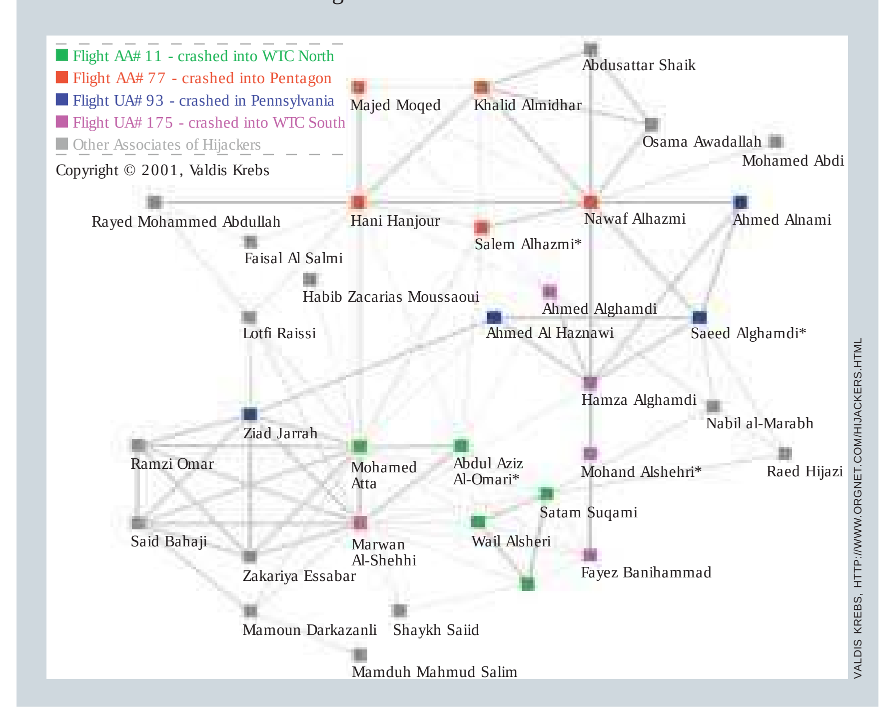
Die wichtigsten Themen aus einer Dokumenten-Datenbank der National Institutes of Health, als Gebirgslandschaft dargestellt mit der Visualisierungstechnik ThemeView. Die Themen HIV und Tuberkulose sind durch hohe, eng benachbarte Gipfel (links oben im Bild) vertreten.

Ein Beziehungsgraph

Das Netz des Terrors

Die Grafik zeigt die öffentlich bekannt gewordenen Beziehungen zwischen den Flugzeugentführern des 11. September 2001. Ausgangsmaterial ist nur eine Liste der Personen und ihrer Kontakte untereinander – genau das, was einen abstrakten Graphen aus Knoten (Personen) und Kanten (Kontakten) ausmacht. Für eine konkrete Wiedergabe dieses abstrakten Graphen kommt es darauf an, die Knoten so in die Bildfläche zu setzen, dass die Kanten möglichst kurz und übersichtlich – nicht überlappend – verlaufen. Dazu wurden die Knoten nach Anzahl und Bedeutung der von ihnen ausgehenden Verbindungen analysiert und Knoten mit engen Beziehungen zueinander möglichst dicht beieinander angeordnet.

Obwohl das Bild das komplexe Beziehungsgeflecht nicht in seiner Gesamtheit zeigen kann, ist klar erkennbar, dass die vermuteten Anführer der vier Flugzeugentführungen in einer relativ engen Beziehung zueinander standen, wohingegen die restlichen Mittäter nur wenige direkte Kontakte zu den Anführern und untereinander hatten. Interessant ist auch die Rolle von Nawaf Alhazmi, der eine zentrale Rolle bei der Vorbereitung der Anschläge spielte, aber keine direkten Kontakte zu den Anführern hatte.



VALDIS KREBS, HTTP://WWW.ORGNET.COM/HIJACKERS.HTML

der ausgeprägtesten Vermittlerfunktion ermitteln, aber nur schwer ein Gesamtbild der Abhängigkeiten verdeutlichen.

Nicht immer sind die Datenmengen so klein wie im Beispiel der Flugzeugentführer (34 Personen mit weniger als hundert Beziehungen). Betrachtet man beispielsweise Verbindungen in Telefon- oder Computernetzwerken, das Kaufverhalten von Kunden im Internethandel oder die Hyperlinks im World Wide Web, so erhält man Graphen mit Millionen von Knoten und Billionen von Beziehungen. Den gesamten Graphen des Internets auf dem Bildschirm darzustellen ist ein hoffnungsloses Unterfangen; aber mit geeigneten Techniken bekommt man gleichwohl einen gewissen Überblick.

Eine gewöhnliche Landkarte der Erde schöpft die zwei Dimensionen, die ein Bildschirm oder ein Stück Papier bieten, bereits vollständig aus (von den Schwierigkeiten der Landkartenprojektion ganz abgesehen); für weitere Informationen zu einem Internet-Knoten – über dessen geografischen Standort hinaus – ist kaum noch Platz. Die im Projekt Skitter verwendete Visualisierungstechnik löst das Problem, indem sie eine der beiden Dimensionen, nämlich die geografische Breite, schlicht nicht wiedergibt und den gewonnenen Freiraum für eine instruktive Anordnung der Knoten nutzt: Je wichtiger der Knoten, desto weiter innen im Darstellungskreis wird er angesiedelt (Kasten unten). Obgleich die Nord-Süd-Richtung dabei völlig vernachlässigt wird, erlaubt die Visualisierung wichtige Rückschlüsse auf die technische Realisierung der Netzwerke, wie zum Beispiel Verkabelung und Router-Platzierung, sowie politische Faktoren wie enge wirtschaftliche und politische Verflechtungen zwischen Ländern.

Selbst wenn die Verbindungen zwischen den Knoten nicht das gesamte Bild bis zur Unkenntlichkeit zudecken würden, kann eine geografisch getreue Darstellung problematisch bis unverständlich sein – dann nämlich, wenn sich an einzelnen Stellen die Knoten so häufen, dass ihre Darstellungen sich zu sehr überlappen. Die Visualisierungstechnik Gridfit schafft Abhilfe, indem sie in dicht besetzten Gebieten die Punkte systematisch, aber nur wenig auseinanderrückt. Nachdem eine überlagerungsfreie Darstellung der Pixel gefunden ist, kann die Entwicklung der zugehörigen Daten über die Zeit betrachtet werden (Bild rechts).

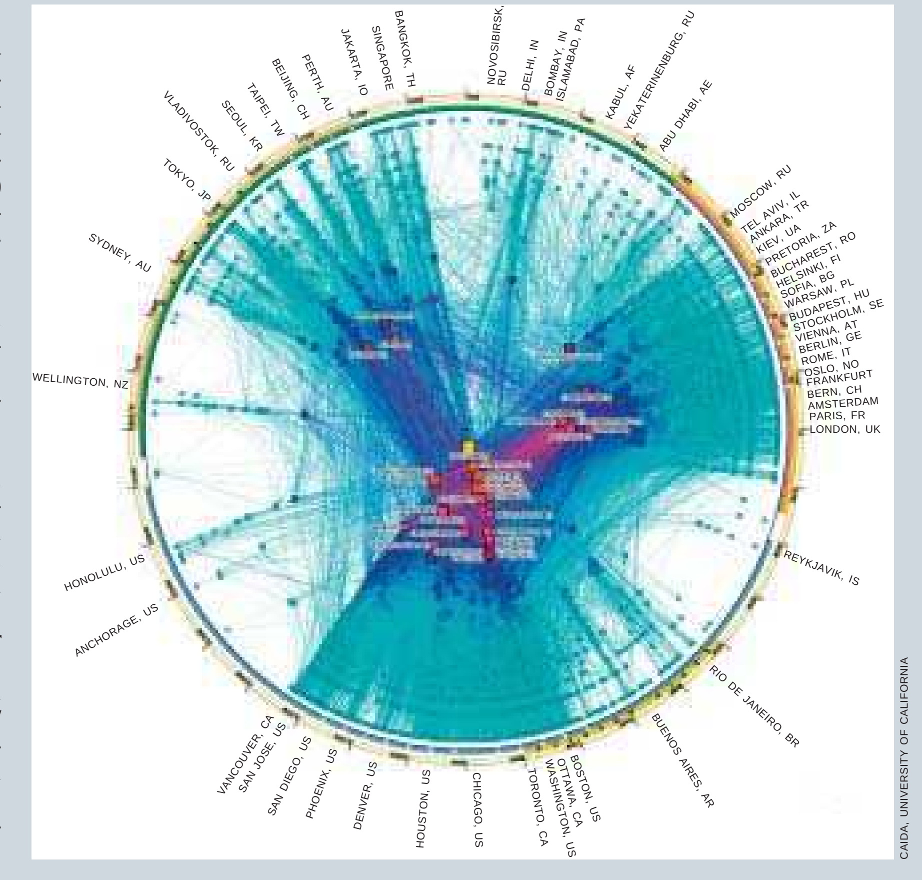
Viele Daten, die in industriellen oder wissenschaftlichen Datenbanken abgespeichert sind, haben Hunderte oder sogar Tausende von Attributen. In den meisten Fällen gibt es nicht die zwei oder drei wichtigsten Attribute (oder Kombinationen von Attributen), zu deren Gunsten man alle anderen vernachlässigen könnte; deswegen sind die Daten in einem zwei- oder dreidimensionalen Koordinatensystem nicht angemessen darstellbar. Für solche Fälle ist die Parallele-Koordinaten-Technik geeignet: Jede Koordinate (jedes Attribut) entspricht einer von beliebig vielen parallelen Achsen, die jeweils so skaliert sind, dass alle für diese Koordinate vorkommenden Datenwerte gerade hineinpassen. Ein Daten-

Ein globaler Internet-Graph

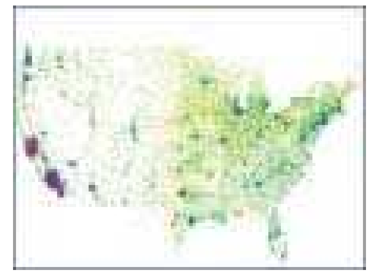
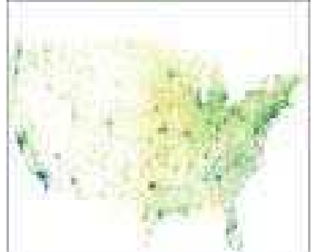
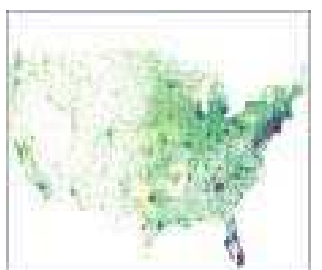
Die Erde ist eine Scheibe, und die wichtigsten Internet-Knoten sitzen in der Mitte

Die hier abgebildeten 7563 Knoten entsprechen im Wesentlichen jeweils einem Internet-Diensteanbieter, und die Verbindungen zwischen ihnen kennzeichnen direkte (nicht über weitere Vermittlungsknoten laufende) Verbindungen zwischen den Knoten, die während eines zweiwöchigen Beobachtungszeitraums im Oktober 2000 genutzt wurden. Das abgebildete Netz ist nur ein kleiner Teil des gesamten Internets, könnte jedoch ungefähr die Hälfte aller Internet-Adressen erreichen.

Die Knoten sind entsprechend ihrer geografischen Länge angeordnet, wobei die wichtigen Knoten mit einer hohen Anzahl von Verbindungen weiter innen liegen und entsprechend eingefärbt sind. Deutlich zu erkennen sind der hohe Verbindungsgrad innerhalb von Nordamerika und die starken Verbindungen zwischen Europa / Asien und den USA. Direkte Verbindungen zwischen Europa und Asien beziehungsweise innerhalb von Europa oder Asien sind dagegen weniger zahlreich.



CAIDA, UNIVERSITY OF CALIFORNIA


IEEE

Telefonanruf-Volumen in den USA um Mitternacht sowie um 4, 8 und 12 Uhr New Yorker Zeit (Eastern Standard Time). Anfangs wird an der Westküste noch mehr telefoniert, weil es dort erst früher Abend ist. Um 4 Uhr morgens EST findet die maximale Aktivität in der Mitte der USA statt, weil dort zahlreiche rund um die Uhr besetzte Servicezentralen ansässig sind.

satz enthält für jede Koordinate einen Zahlenwert; der entspricht einem Punkt auf der zugehörigen Achse, und der Datensatz wird veranschaulicht durch die gebrochene Linie, die diese Punkte verbindet (Bild Seite 81).

Wenn die Daten eine hierarchische Ordnung haben, also in Abteilungen, Unterabteilungen und möglicherweise deren Unterabteilungen gegliedert sind, wünscht man sich ihre Darstellungen entsprechend dieser Hierarchie gegliedert. Ein nahe liegendes Mittel ist die klassische Baumstruktur: Die Äste geben die Hierarchie wieder, und die Blätter sind die einzelnen Daten. Ein Visualisierungsverfahren namens Treemap ordnet diesen Baum so an, dass die – stets rechteckigen – Blätter so groß sind, wie es ihrer Bedeutung entspricht, in ihrer Anordnung die Hierarchie wiedergeben (Blätter aus derselben Abteilung sind benachbart) und durch ihre Farbe weitere Information tragen.

Daten, die nicht „von Natur aus" zahlenmäßig sind, vor allem Texte, lassen sich durch eine Reihe von Transformationen auf zahlenmäßige Daten abbilden und dadurch in ein Koordinatensystem bringen. Die einfachste Abbildung dieser Art ist das Auszählen aller nicht-trivialen Wörter im Text. Aus der Häufigkeit, in der zwei Wörter in enger Nachbarschaft in einem Text vorkommen, schließt man auf ihre thematische Verwandtschaft; die wiederum wird in ein abstraktes Abstandsmaß umgesetzt – je enger die Verwandtschaft, desto geringer der Abstand. Dann platziert man die Wörter so in einen abstrakten Raum, dass die Abstände stimmen. Dabei ergeben sich Cluster („Familien") von eng verwandten Begriffen. In diesem – vieldimensionalen – Raum wählt man eine Perspektive, unter der die Cluster einigermaßen gleichmäßig verteilt erscheinen. Am Ende stellt die in den Pacific Northwest National Laboratories entwickelte Visualisierungstechnik ThemeView eine große Menge von Textdokumenten als eine Landschaft dar, deren Berge den am meisten angesprochenen Themengebieten entsprechen (Bild Seite 89 oben).

Wie auch immer die Daten zusammengefasst auf dem Bildschirm des Benutzers landen – er wird sich häufig eine Lupe wünschen: ein Hilfsmittel, das ihn an bestimmten Stellen genauer hinsehen lässt, ohne dass er die Umgebung dieser Stelle aus dem Blick verliert. Verschiedene Techniken des visuellen Data Mining stellen solche Lupen bereit. Wenn der Benutzer nun die gedachte Lupe über das Gesamtobjekt schweifen lässt, muss das Programm ihm in Echtzeit eine etwas andere Detailansicht liefern, was die Fähigkeiten des Systems aufs äußerste fordern kann.

Texte werden zu Landschaften, mit den wichtigsten Wörtern als Gipfeln

Eine Lupe für Tabellen ist das Programm TableLens, das auf Wunsch des Benutzers bestimmte Zeilen oder Spalten einer Tabelle sichtbar macht, während alle anderen Tabelleneinträge nur durch kleine Balken angedeutet werden.

Für geografische Daten oder allgemein große Graphen bietet sich die hyperbolische Verzerrung an: Die interessierende Stelle wird vergrößert, während die Umgebung nicht etwa, wie bei einer echten Lupe, ausgeblendet, sondern an den Rand des Bildes gedrückt wird. So bleibt der Überblick über den Gesamtkontext erhalten.

Hilfreich ist häufig auch eine Kombination verschiedener Visualisierungstechniken. Eine weit verbreitete Technik ist das „Linking und Brushing" (Verknüpfung und Einfärbung). In mehreren Darstellungen derselben Datenmenge werden einander entsprechende Elemente auf gleiche Weise hervorgehoben – typischerweise durch gleiche Einfärbung. Dadurch werden Abhängigkeiten und Korrelationen in den Daten erkennbar. Interaktive Veränderungen in einer Darstellung werden in den anderen sofort sichtbar. Zwei durch „Linking und Brushing" verknüpfte Bilder lassen im Allgemeinen mehr erkennen als die beiden Bilder für sich.

Visuelle Datenexploration wird heute schon erfolgreich eingesetzt in der Betrugserkennung, im Marketing und beim Data Mining in biomolekularen Datenbanken. Fast alle kommerziellen Data-Mining-Systeme sind derzeit dabei, zur Steigerung von Qualität und Effizienz neuartige Visualisierungstechniken in ihre Software zu integrieren. Die Anbindung an traditionelle Techniken aus den Bereichen Statistik, maschinelles Lernen und Operations Research ist eine Aufgabe für die Zukunft. Fernziel ist ein integriertes, leicht bedienbares und verständliches System, das eine schnelle Exploration großer Datenmengen ermöglicht. ■

Literaturhinweise

Designing pixel-oriented visualization techniques: Theory and applications. Von Daniel Keim in: Transactions on Visualization and Computer Graphics, Bd. 6, Nr. 1, S. 59, Jan.–März 2000.

The gridfit approach: An efficient and effective approach to visualizing large amounts of spatial data. Von D. Keim und A. Herrmann in: Proceedings Visualization 98, Research Triangle Park, NC. IEEE, 1998, S. 181.

*Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis"*



Daniel A. Keim *hat eine Reihe neuartiger Techniken der visuellen Datenanalyse entwickelt. Er promovierte und habilitierte sich an der Universität München. Seit September 2000 leitet er die Arbeitsgruppe Datenbanken und Visualisierung an der Universität Konstanz.*

CODING TECHNOLOGIES

Zerhacken, Verpacken, Rekonstruieren



CODING TECHNOLOGIES

Lang-, Mittel- und Kurzwelle übertragen Musik und Sprache dumpf und voller Störungen. Neue Komprimierungs- und Übertragungstechniken sollen jetzt sogar digitalen Rundfunk in diesen Frequenzbereichen möglich machen; hier einer der ersten Empfänger.

Musik per Handy? Die Betreiber mobiler Netze hoffen auf diesen Markt. Doch um gute Hörqualität zu liefern, müssten sie hohe Datenraten anbieten. Das aber treibt den Preis hoch, da der Nutzer künftig nicht die Dauer der Verbindung, sondern die übertragene Datenmenge bezahlt. Werden die Dateien jedoch komprimiert, sind einige Klimmzüge erforderlich, um echten Hörgenuss zu liefern. Dieses Problem wurde beim Herunterladen von Musikdateien aus dem Internet durch das Format MP3 schon gut gelöst, doch auch hier gibt es Raum für Verbesserungen.

Die in Nürnberg und Stockholm ansässigen Spezialisten des schwedisch-deutschen Unternehmens Coding Technologies haben deshalb die so genannte SBR(Spectral Band Replication)-Technik entwickelt, die mit beliebigen Komprimierungsverfahren verknüpft werden kann. In Kombination mit der auf digitalen Rundfunk zugeschnittenen Variante des MPEG-Standards (Motion Pictures Expert Group), MPEG AAC (Advanced Audio Coding), bietet SBR eine vom Original kaum unterscheidbare Qualität bei Datenraten von nur 24 Kilobit pro Sekunde je Stereokanal. „Ein CD-Spieler schickt 1,4 Megabit pro Sekunde in den Verstärker, selbst eine MP3-Datei braucht 128 Kilobit pro Sekunde – die doppelte ISDN-Geschwindigkeit", erklärt Martin Dietz, Chef des deutschen Unternehmens und einer der Väter von MP3.

Alle Techniken zur Kompression von Audiodateien beruhen auf der Psychoakustik, der Wahrnehmung von Tönen im menschlichen Ohr. Vereinfacht gesagt: Wenn zartes Vogelgezwitscher von einem vorbeifahrenden Zug übertönt wird, dann wird der Vogelgesang in einer komprimierten Datei einfach weggelassen. Alle diese Verfahren teilen Audiosignale in Frequenzabschnitte ein. Eine Software identifiziert in jedem dieser Blöcke die schwächeren Signale unterhalb der so genannten Maskierungsschwelle und rechnet sie heraus. Damit wird Informationsdichte ohne hörbare Störungen eingespart. Die Signale werden digitalisiert und übertragen. Ein Decoder entziffert später das komprimierte Signal.

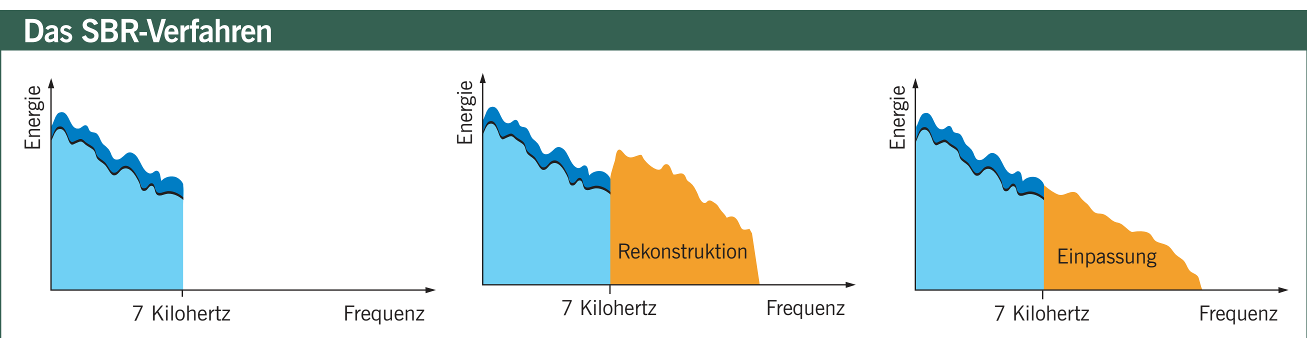
Was weg ist, ist …?

Das funktioniert gut bei ausreichend hoher Übertragungsgeschwindigkeit. Sinkt diese unter eine für das Komprimierungsverfahren akzeptable Rate, entsteht Rauschen, das die Maskierungsschwelle überschreitet: Die Musik enthält deutliche Störgeräusche. Um auch bei geringen Datenraten noch ohne Störungen übertragen zu können, wird dann der hohe Frequenzbereich abgeschnitten. Das spart zwar viele Bits, die Musik klingt dann aber dumpf.

Nun kommt SBR ins Spiel. Die Technik setzt auf die gängigen Komprimierungsverfahren auf. So wird aus SBR und MP3 das neue Verfahren mp3PRO, das nur noch halb so viel Speicherplatz bzw. Download-Zeit wie eine MP3-Musikdatei benötigt. SBR übernimmt die Aufgabe, aus dem unteren Frequenzbereich die Töne der höheren Frequenzen wiederherzustellen. Das funktioniert, da es Korrelationen zwischen den tiefen und den hohen Tönen gibt. Beispiel Violine: Bei diesem Instrument sind die Grund- und Obertöne über Frequenzverhältnisse verknüpft; fehlende Obertöne können also rekonstruiert werden. Klingen mehrere Instrumente zusammen, ist das Verhältnis deutlich komplexer. Bei mp3PRO codiert MP3 nur die tiefen Töne bis zu einer Frequenz von rund sieben Kilohertz und benötigt daher bedeutend weniger Daten. Für die hohen Töne reichen einige Kilobit an zusätzlichen SBR-Informationen aus. Im Decoder berechnet ein Algorithmus daraus die abgeschnittenen Frequenzen bis etwa 15 Kilohertz, die dann noch exakt an das Teilspektrum der tiefen Frequenzen angepasst werden.

SBR-Technik ermöglicht auch digitalen Rundfunk auf Lang-, Kurz- und Mittelwelle, das so genannte Digital Radio Mondiale (DRM). Diese heute wenig genutzten Frequenzbereiche bieten ge-

Das SBR-Verfahren



Um Musik und Sprache bei niedrigen Datenraten zu übertragen, schneidet das Codierverfahren mp3PRO hohe Frequenzen bei etwa sieben Kilohertz ab, was Bits einspart, den Klang aber dumpf macht (linke Grafik). Die schwarze Linie entspricht der Maskierungsschwelle; Frequenzen geringerer Energie hört man nicht, sie werden deshalb nicht übertragen. Das SBR-Verfahren berechnet anhand von Korrelationen aus dem unteren Frequenzbereich die hohen Töne (mittlere Grafik) und passt deren Energieverteilung dann in das Spektrum ein (rechte Grafik).

THOMAS BRAUN; QUELLE: CODING TECHNOLOGIES

Das Unternehmen im Profil

Vater von Coding Technologies ist der Schwede Lars Liljeryd. Er ersann das Konzept von SBR (Spectral Band Replication) während einer Kooperation mit der Ölindustrie. Um die Lunge von Tiefseetauchern vor dem Wasserdruck zu schonen, wird ihrer Atemluft Helium beigemischt, was den Tauchern aber eine Fistelstimme verleiht. Liljeryd entwickelte einen Sprechfunk, der die Stimmen digital auf ihre normale Höhe zurechtrückte. Er gründete das Unternehmen Anfang 1997 in Stockholm, im Jahr 2000 die deutsche Coding Technologies GmbH. Im Zuge der Standardisierung für DRM (Digital Radio Mondiale) arbeitete das Unternehmen mit den Audio-Codier-Experten des Fraunhofer-Instituts für integrierte Schaltungen sowie namhaften Unternehmen der Radiobranche zusammen.

genüber den gebräuchlichen Ultrakurzwellen Vorteile. Die verlieren nämlich schon nach wenigen hundert Kilometern zu stark an Intensität oder werden gestreut, während ein einziger DRM-Sender landesweit oder sogar überregional ausstrahlen kann. Andererseits lässt sich mit kostengünstigen Sendern geringer Leistung ein Lokalrundfunk realisieren. Dass sich der UKW-Bereich durchgesetzt hat, ist natürlich begründet: Lang-, Kurz- und Mittelwelle bieten nur schmale Frequenzbänder, Verzerrungen über größere Distanzen sind die Regel. Aus diesem Grund müssen die Signale stark komprimiert werden; hier kommt SBR ins Spiel. Außerdem sollte das Übertragungsverfahren Aussetzer kompensieren können.

Ein DRM-Konsortium will diese wenig genutzten Frequenzen attraktiv machen. Testsendungen strahlen die Telekom-Tochter T-Systems und das DeutschlandRadio bereits aus. Die ersten DRM-Geräte werden auch den heute üblichen analogen Rundfunk empfangen können. Die digitale Signalverarbeitung erlaubt es Herstellern, ohne größere Mehrkosten auch andere Standards von Satellitensendern oder DAB in die Empfänger zu integrieren. Coding Technologies hat im September auf der Internationalen Rundfunk-Messe in Amsterdam mit Partnern ein solches Radio vorgestellt.

Norbert Aschenbrenner

Der Autor ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in München.

ARTENSCHUTZ

Kultur bei Schimpansen?

Die Forschungsarbeiten von Jane Goodall tragen Früchte: Wissenschaftler plädieren dafür, Menschenaffen auf der Grundlage von Respekt, Recht und Würde zu schützen.

Von Theodor C. H. Cole

Ja, was ist eigentlich „Kultur" beim Menschen? Ein Blick in die Literatur verrät: Die Wissenschaft ist sich da nicht einig. Mehr als ein Dutzend verschiedene Definitionen lassen sich im naturwissenschaftlichen Kontext aufzählen. Ist es Werkzeuggebrauch und Sprache, die Erfindung der Schrift? Ist es die Bearbeitung von Gegenständen, deren ästhetische Veränderung und Zweckentfremdung – die beschauliche Kontemplation? Oder ist es die Fähigkeit, sich Erkenntnisse und Verhalten durch soziales Lernen und kognitive Beobachtung anzueignen? Legen wir letztere Definition zu Grunde, dann müsste jedes Lebewesen mit diesen Eigenschaften kulturfähig sein – also auch Schimpansen, Delfine, Wale, Vögel und andere Tiere. Was also unterscheidet Mensch und Tier?

In den frühen 1960er Jahren berichtete die junge Schimpansenforscherin Jane Goodall in der US-Zeitschrift „National Geographic" über mehrere Persönlichkeiten: David Graybeard, Faben, Fifi, Flo und Goliath. Sie stellte deren Freunde und Familien vor, gewährte Einblicke in Familienstreitigkeiten und beschrieb emotionale Regungen wie Freude und Tränen. Auf einmal erschienen diese Schimpansen nicht mehr als Tiere, sondern als Lebewesen mit Gefühlen und mit Würde. Sie verfügten über ein großes Repertoire verschiedenster Laute (kann man es wohl „Sprache" nennen?), führten „Kriege", benutzten Heilpflanzen und waren – in Ausnahmesituationen – sogar kannibalisch. Dass auch Werkzeugherstellung und -gebrauch nicht allein eine menschliche Fähigkeit ist, hatte Goodall erkannt, als sie beobachtete, wie Schimpansen mithilfe eines zuvor entsprechend präparierten Zweiges oder Grashalms in einem Termitenbau stocherten, um dann die daran krabbelnden Termiten abzulecken (siehe Bild rechts).

„Culture in chimpanzees" betitelten denn auch neun namhafte Schimpansenforscher einen Artikel, der die Ergebnisse von sieben Forschungsprojekten beschreibt („Nature", 17. Juni 1999). Die Autorengruppe unter Federführung von Andrew Whiten von der Universität St. Andrews in Schottland fasst hierin insgesamt 151 Jahre Feldstudium an Schimpansen zusammen. Allein die Mitautorin Jane Goodall hat hierzu 38 Jahre beigetragen. In der kürzlich erschienenen „Encyclopedia of Evolution" (Oxford University Press, 2002) geht sie auf die Kernaussagen des „Nature"-Artikels ein und erweitert diese um eine umfassende Diskussion des Begriffs „Kultur".

Das Verhalten von Schimpansen ist mittlerweile so gut untersucht, dass auch die Unterschiede erfasst sind, die in den einzelnen Populationen trotz ähnlicher Umweltbedingungen auftreten. So konnten 39 erlernte Verhaltensmuster ausgemacht werden, die je nach Population ganz unterschiedlich ausgeprägt sein können. Ob und wie Nüsse geknackt, Termiten „gefischt" oder ausgegraben werden, Körperpflege betrieben wird und Begattungsrituale ablaufen, scheint rein kulturell begründet zu sein. Es gibt also offenbar unterschiedliche „Traditionen" in den einzelnen Gesellschaftsgruppen der Schimpansen. Und dies betrifft eine Vielzahl von Verhaltensmustern, wie die Forscher in der gemeinsamen Stellungnahme in „Nature" konstatieren.

Schimpansen sind enorm lernfähig: In Gefangenschaft können sie menschliche Zeichensprache wie zum Beispiel ASL (American Sign Language) erlernen und diese an ihre Kinder weitergeben. So wie wir Menschen schützen sich



MICHAEL NEUGEBAUER

Die Engländerin Jane Goodall ist durch ihre jahrzehntelangen Forschungen an frei lebenden Schimpansen bekannt geworden. Hier unterhält sie sich mit dem Schimpansenwaisenkind Uruhara in einer Schutzeinrichtung in Kenia.



JANE GOODALL

Die Schimpansendame Pom lutscht Termiten von einem Grashalm, den sie zuvor als Angel benutzt hat.

Schimpansen vor Krankheit und Vergiftung – etwa durch Auswahl bestimmter Heilpflanzen oder durch Ausgraben und Essen spezieller Tonerden. Das sind erworbene Kenntnisse, die auch an andere Gruppenmitglieder weitergegeben werden können. Die Forscher verzeichnen hier ebenfalls erhebliche regionale und umweltbedingte Unterschiede in den untersuchten Gruppen. Michael Wink, Biologe und Pharmazeut in Heidelberg, kennt das Erdeessen, die so genannte Geophagie, auch bei Vögeln, Huftieren und Elefanten – vor allem bei Pflanzenfressern: „Dieses Verhalten könnte sich auch konvergent entwickelt haben“, sagt er, also mehrmals und unabhängig voneinander im Laufe der Evolution.

War der Neandertaler ein Tier? Sind Schimpansen menschenartig? Der Unterschied zwischen Mensch und Tier verschwimmt. Viele Wissenschaftler erwägen, Schimpansen in die Gattung *Homo* neben dem Menschen und dessen unmittelbaren Vorfahren einzuordnen. Für kein anderes Lebewesen wären derart geringe Unterschiede in Genom und Verhalten gewichtig genug, eine Trennung in unterschiedliche Gattungen zu rechtfertigen.

Der Tierrechtsexperte Steven M. Wise von der Harvard Law School in Cambridge (Massachusetts) setzt sich dafür ein, Menschenaffen Würde und somit den Rechtsstatus von Personen zuzuschreiben. Entsprechend wären sie mit Grundrechten auszustatten, um sie vor Verfolgung und Missbrauch zu schützen. Unsere nächsten Verwandten seien sozusagen „Weltkulturerbe“ – sie zu schützen sei geradezu kulturelles Gebot. Ein erster Schritt auf nationaler Ebene war die Verankerung des Tierschutzes im deutschen Grundgesetz. Der Artenschutz ist zwar international gesetzlich geregelt; aber viele Arten bleiben nach wie vor vom Menschen bedroht, unter anderem deshalb, weil vorhandene Gesetze nicht oder nur unzureichend umgesetzt werden.

Die meisten Menschen kennen Schimpansen nur aus dem Zoo oder Zirkus: entwürdigende Unterhaltung für Spaßhungrige, Bildungsprogramm für Wissbegierige oder notwendiges Übel zum Artenschutz. Eine Diskussion über Ethik in der Tierhaltung ist unter Primatenforschern in vollem Gange.

Erfreulich ist, dass sich in letzter Zeit einige Zoos um artgerechtere Haltung von Menschenaffen bemühen. So errichtet zum Beispiel der Allwetterzoo Münster gegenwärtig das „Africanum“, ein großes Menschenaffengehege, das – angeschlossen an das „ChimpanZoo“-Projekt des Jane-Goodall-Instituts – für angemessene Lebensbedingungen sorgen will. In freier Wildbahn lassen sich Schimpansen und andere Menschenaffen nur erhalten, wenn Schutzmaßnahmen auf eine breite Grundlage gestellt und auch durchgesetzt werden.

Im Rahmen des „Great Ape Survival Project“, das die Umweltorganisation der Vereinten Nationen entwickelt hat, äußerte Jane Goodall auf dem Weltgipfel von Johannesburg letzten September ihre Sorge: „Ohne sofortige Maßnahmen werden nach höchstens 15 Jahren anhaltender Lebensraumzerstörung und ungebremster Jagd von Wildtieren sowohl Schimpansen als auch Gorillas und Orang-Utans ausgerottet sein.“ Nur durch sofortigen aktiven politischen und wirtschaftlichen Einsatz ließe sich diese Tragödie verhindern.

Unser kulturelles und existenzielles Selbstverständnis hat auch etwas damit zu tun, wie wir unsere nächsten Verwandten achten. ■

Während eines Deutschlandaufenthaltes wird Jane Goodall zwei öffentliche Vorträge halten: am 9.12. in Münster und am 10.12. in Heidelberg. Weitere Informationen finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis“.

Theodor C. H. Cole *ist Biologe und Dozent in Heidelberg.*

NACHGEHAKT

Rache ist süß – und Nichtrache bequem

Noch nie habe ich in einer ernsthaften wissenschaftlichen Veröffentlichung die Rachsucht so positiv bewertet gefunden wie in dem Artikel „Teilen und Helfen – Ursprünge sozialen Verhaltens“ (Spektrum der Wissenschaft 03/2002, S. 52).

Rache ist süß: Wenn die Mitglieder einer Gemeinschaft die Gelegenheit haben, einander zu bestrafen, sprich: ihresgleichen unter Inkaufnahme eigener Nachteile noch größere Nachteile zu verschaffen, dann machen sie davon nicht nur reichlich Gebrauch. Sie tun es auch mit Inbrunst, um ihre Vorstellungen von Fairness durchzusetzen.

Mehr noch: In den Experimenten der Autoren Karl Sigmund, Ernst Fehr und Martin Nowak funktionieren Gemeinschaften mit Rachemöglichkeit weitaus besser als ohne. Bereits die Androhung von Strafe veranlasst die Mitglieder zu so konformem Verhalten, dass die Gemeinschaft blüht und gedeiht, zum Nutzen auch derer, die zunächst die Bürde der Strafaktion auf sich genommen haben.

Angenommen, dieses Ergebnis gebe einen wesentlichen Aspekt der gesellschaftlichen Realität wieder. Dann wäre Rache nicht nur süß, sondern auch gut, zumindest für die Gesamtgesellschaft, wenn nur der heilige Zorn, das tief verwurzelte Gefühl für Fairness, die Triebfeder wäre.

Das stimmt nun offensichtlich nicht. Die meisten Formen der Selbstjustiz sind mit gutem Grund verboten. Meine Eltern haben mich mit viel Mühe und Geduld dazu erzogen, dem heiligen Zorn eben nicht nachzugeben, wenn mein jüngerer Bruder solchen erregte, und das mit Erfolg und zu meinem eigenen Nutzen: Er und ich haben einander während unserer Kindheit keinen ernsthaften Schaden zugefügt.

Aber nehmen wir die weniger dramatischen Fälle, in denen keine Rachespirale droht. Meine Eltern haben ja klugerweise das Gebot, nicht zurückzuschlagen, zweifach begründet: „Wenn du nicht zurückschlägst, bist du ein besserer Mensch“; und weil mich das mit neun Jahren nicht so ganz überzeugte: „Du hast nichts davon.“

Das zweite Argument ist das des nutzenmaximierenden *homo oeconomicus*; aber es ist nachrangig, vor allem in den Augen der Eltern, die Wert darauf legen, dass ihr Kind ein anständiger Mensch wird. Was aber, wenn das vorrangige Argument ausfällt oder in sein Gegenteil umschlägt? Wenn ich mir die Mühe mache, mich des Nachts mit einem Radfahrer wegen dessen defekter Beleuchtung anzulegen, oder ihn gar anzeige? Kleiner Nachteil für mich, großer Nachteil für ihn, und ich bin ein besserer Mensch, weil ich durch Konformitätsdruck zur Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit beitrage.

Also bleibt, wie in den eingangs zitierten Experimenten, die Abwägung zwischen Eigennutz und Gemeinnutz. Die Gelegenheit dazu kommt häufiger, als mir lieb ist, wie die folgenden Geschichten zeigen.

Ein Zugbegleiter beschimpft mich und unterstellt mir betrügerische Absichten, weil ich – den missverständlichen Anweisungen auf dem Automaten folgend – eine ungeeignete Fahrkarte gelöst habe. Ich schreibe eine Beschwerde, bekomme nach einigen Wochen einen Entschuldigungsbrief von der Deutschen Bahn und sogar die strittigen 3,40 Euro zurück. Tolles Gefühl. Aber ein schlechtes Geschäft: Es hat mich einen langen Abend gekostet, die Beschwerde zwar treffend, aber so zu formulieren, dass sie nicht ihrerseits den Tatbestand der Beleidigung erfüllte.

Ein Lastwagenfahrer übersieht mich, während er, meine Vorfahrt missachtend, langsam auf die Kreuzung vorzieht, und wirft mich mitsamt meinem Fahrrad zu Boden. Diesmal bin ich nicht in erster Linie zornig, sondern knieweich. Aber als ich dem Fahrer mitteile, dass er mich um ein Haar umgebracht hätte, und er sich davon gänzlich unbeeindruckt zeigt, packt mich der richtige Zorn. Ich lasse mir von ihm und einer Augenzeugin die Adresse geben – und gehe dann doch nicht zur Polizei. Warum? Erstens wäge ich ab: Der Aufwand, einen Polizisten von der Schwere der Tat zu überzeugen, ohne einen Schaden vorweisen zu können (außer ein paar Kratzer), gegen die äußerst magere Aussicht, bei diesem dumpfsinnigen Menschen einen Erziehungserfolg zu erzielen – das ist, wie immer man einen solchen Erfolg bewerten mag, ein schlechtes Geschäft. Zweitens: So einen Mist wie der habe ich auch schon gemacht und war froh, dass mich niemand angezeigt hat. Irgendwie wäre eine Anzeige jetzt unfair.

Ich will einen gebrauchten Flügel kaufen, und der Verkäufer verhält sich so, dass mein Vertrauen dahinschwindet: Er verschweigt, dass das sperrige Tasteninstrument für teures Geld mit einem Kran aus dem Haus gehoben werden muss, stellt nachträgliche Forderungen, hält Zusagen nicht ein, erzählt mir Dinge am Telefon, die sich später als falsch herausstellen – eigentlich müsste man die Geschäftsbeziehung mit ihm abbrechen. Aber das wäre nicht ein kleiner Nachteil für mich und ein großer für ihn, sondern ein großer für mich, denn dann würde ich den Flügel nicht kriegen. Ich wäge ab und akzeptiere schließlich den Handel. Die Freude an der Neuerwerbung übertönt das ungute Gefühl, gegen die eigenen Prinzipien verstoßen zu haben.

Bis der Klaviertechniker kommt, mir die unscheinbaren Risse im Resonanzboden, die abgespielten Hämmer und einige andere Macken zeigt und mich darüber aufklärt, dass ich für das gute Stück ungefähr den anderthalbfachen Marktpreis bezahlt habe.

Christoph Pöppe *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*



BIOWAFFEN

Inspektionen: die Schlüsselfrage

Wie suchen Inspektoren der Vereinten Nationen nach Massenvernichtungswaffen? Welchen Problemen begegnen sie im Irak? Die Tierärztin und Mikrobiologin Gabriele Kraatz-Wadsack berichtet über ihre Erfahrungen als UN-Inspektorin.



Gabriele Kraatz-Wadsack, Sanitätsoffizierin der Bundeswehr und von 1995 bis 1998 UN-Inspektorin, ist derzeit am Robert-Koch-Institut in Berlin.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Dr. Gabriele Kraatz-Wadsack, Sie haben umfangreiche Erfahrungen mit Inspektionen im Irak. Wie lange haben sie dort nach Biowaffen gesucht?

Dr. Gabriele Kraatz-Wadsack: Von Januar 1995 bis Dezember 1998, als die Inspektoren den Irak verlassen mussten, habe ich an 26 UN-Inspektionsmissionen teilgenommen, davon achtmal als Chefinspektorin. Insgesamt war ich über anderthalb Jahre im Irak.

Spektrum: Das Dossier über irakische Massenvernichtungswaffen, das der britische Premierminister Tony Blair im September vorgelegt hat, versucht die Bedrohung durch die verbotenen Aktivitäten des Irak deutlich zu machen. Steht für Sie da überhaupt etwas Neues drin?

Kraatz-Wadsack: Soweit das Blair-Dossier den Stand bis Ende 1998 beschreibt, deckt sich das völlig mit dem Abschlussbericht, den unser damaliger Leiter Richard Butler im Januar 1999 vorgelegt hat. Darin wird die Brisanz der Biowaffen-Problematik besonders hervorgehoben. Das Dossier liefert da nichts Neues.

Für die Zeit nach 1998 gibt es allerdings auch Informationen von Überläufern wieder. Und da heißt es: Der Irak könnte …, der Irak hat wahrscheinlich … Das Dossier spricht nicht von gesicherten Informationen – kann es auch nicht. Nur Vor-Ort-Inspektionen durch geschulte Experten können hier Aufklärung bringen.

Spektrum: Wenn sich an der Erkenntnislage so wenig geändert hat, wie erklären Sie sich den Meinungsumschwung, den das Blair-Dossier im britischen Parlament, aber auch allgemein in der Politik bewirkt hat – vorher eher Ablehnung, danach eher Zustimmung zu einer harten Politik gegenüber dem Irak?

Kraatz-Wadsack: Es hat ja vorher niemanden interessiert, was im Irak los ist, es sei denn, es kam eine Krise. Unseren Abschlussbericht hat kaum jemand gelesen, obwohl er sogar im Internet zugänglich ist. Jetzt, durch die enorme Präsenz in den Medien, ist jeder alarmiert. Die Fachleute sind es schon seit langem. Auch die Politiker hätten die Brisanz zur Kenntnis nehmen können.

Spektrum: Manche Kritiker sagen, Inspektionen seien sinnlos.

Kraatz-Wadsack: Ohne Inspektionen hätten wir gar nicht gewusst, dass der Irak ein Biowaffen-Programm hatte. Das hat er erst zugegeben, nachdem wir 1995 Beweise dafür gefunden hatten. Dann behauptete der Irak, er habe das Programm schon 1991 aufgegeben und alle Bestände in eigener Regie vernichtet. Auch das konnten wir widerlegen. Fakt ist allerdings, dass der Irak vieles tut, um den Inspektoren die Erfüllung ihres Mandats zu erschweren.

Spektrum: Bräuchten Sie nicht weit mehr Inspektoren, um Ihre anspruchsvolle Aufgabe zu erfüllen?

Kraatz-Wadsack: Es ist doch so: Der Irak muss beweisen, dass er nichts hat – nicht wir müssen beweisen, dass er etwas hat.

> Eine Fabrik für Hühnerfutter mit Doppelzaun und Luftabwehr? Klar, dass da etwas faul ist.

Wir suchen ja nicht die Nadel im Heuhaufen. Die UN-Resolution bezieht sich auf Massenvernichtungswaffen – also auf militärische Dimensionen, nicht auf kleine Röhrchen, die irgendwo versteckt sind. Der Irak ist verpflichtet, alle Entwicklungs- und Produktionswege militärischer Massenvernichtungswaffen offen zu legen und dann unter UN-Aufsicht zu zerstören – also alle Waffen, Materialien, Gerätschaften, Produktionsanlagen, Forschungs- und Entwicklungslabors, Unterstützungseinrichtungen. Und wir müssen feststellen: Erfüllt der Irak seine Auflagen, nichts zurückzubehalten, nichts Neues zu produzieren, nichts einzusetzen und sich nichts zu beschaffen?

Spektrum: Wie sind Sie bei Ihren Einsätzen konkret vorgegangen?

Kraatz-Wadsack: Unsere Inspektionsteams waren immer gemäß der gestellten Aufgabe zusammengesetzt. Die Anzahl der Teammitglieder variierte zwischen vier und 44. Es waren nicht nur Mikrobiologen dabei, sondern auch Übersetzer, Berichterstatter usw. Gelegentlich haben wir auch Experten von der Atomenergiebehörde mitgenommen, wenn wir annehmen mussten, dass in den zu überprüfenden Einrichtungen entsprechende Aktivitäten vorhanden sein können.

Wir haben sowohl deklarierte als auch designierte Einrichtungen untersucht – also solche, die der Irak zuvor offen gelegt hat, und solche, die wir gerne überprüfen wollten. Der Irak war und ist verpflichtet, den Inspektoren jederzeit ungehinderten Zugang zu ermöglichen – zu Einrichtungen, zu Informationen, zu Materialien, zu Personen. Im Anhang der Sicherheitsrat-Resolution ist aufgelistet, welche Rohstoffe, Krankheitserreger, Gifte und welche Geräte der Irak zur Besichtigung offen legen muss. Wir haben dann überprüft, ob die Angaben korrekt sind, ob die Zusammenhänge stimmen und haben nach Diskrepanzen gesucht. Als Inspektoren gehen wir dabei eigentlich immer einer Aktivität nach. Also müssen wir in die Einrichtungen, dorthin, wo Personen mit den Geräten und Materialien arbeiten.

Spektrum: Sie sind oft fündig geworden?

Kraatz-Wadsack: Wir sind häufig auf nicht deklarierte Geräte und Diskrepanzen gestoßen. Viele Fragen sind offen geblieben, und auch die Behinderungen, die wir erlebt haben, zeigen, dass der Irak seine Auflagen nicht erfüllt hat.

Spektrum: Ein Beispiel?

Kraatz-Wadsack: Einmal wurde uns eine Einrichtung offen gelegt, in der angeblich Hühnerfutter produziert wurde. Wir stellten dann vor Ort fest: Es gab einen Doppelzaun um die Anlage, mit Luftabwehrgeschützen; die Geräte passten nicht zum deklarierten Zweck, die Leute passten nicht, die Expertise passte nicht. Hier wurden Biowaffen hergestellt.

Spektrum: Aber nicht immer ist die Situation so eindeutig.

Kraatz-Wadsack: Speziell in der Biologie haben Sie das Problem der zivil-militärischen Ambivalenz, des so genannten *dual use*. Viele Einrichtungen, Geräte, Verfahren können schnell von ziviler auf militärische Produktion umgestellt werden, indem Sie einfach die Experten austauschen. Und das war auch passiert: Irak hatte eine Produktionsanlage für einen Maul- und Klauenseuche-Impfstoff. Die gesamte Belegschaft wurde 1990 beurlaubt und durch Biowaffenexperten ersetzt.

Spektrum: Sie müssen also die Gerätetechnik genau unter die Lupe nehmen und die Expertise der Leute ermitteln?

Kraatz-Wadsack: Richtig. Wir analysieren, welche Modifikationen man benötigen würde, wenn man die Einrichtung konvertieren wollte, und wie lange das dauern würde. Manchmal ist es auch nur der Erregerstamm, der den Unterschied macht. Eine Anlage, die einen Anthrax-Impfstoff für die Veterinärmedizin produziert, nutzt einen anderen Ausgangsstamm, als er für Biowaffen erforderlich wäre. Und es wird noch komplizierter: Botulinus-Toxin wird mittlerweile auch in der Augenheilkunde eingesetzt gegen Augennervosität und -zuckungen oder in der Kosmetikindustrie gegen Faltenbildung – das ist zwar hochverdünnt oder inaktiviert, aber dasselbe Botulinus-Toxin, das als Kampfstoff eingesetzt werden kann. Letztlich können Sie also erst am Ende des Verfahrens feststellen, was in der Flasche ist. Ein ziviles Endprodukt muss sich aber irgendwo auffinden lassen – in Krankenhäusern oder in der Veterinärmedizin. Und es muss dokumentiert sein.

Und natürlich fragen wir die Expertise der Leute ab: Wie macht ihr denn eure Substanz XY? An den Antworten merkt man leicht, woran man ist. Ein ziviler Forscher gibt Ihnen gern und sachgerecht Auskunft. Sind die Leute sehr vage oder wenig auskunftsfreudig, dann ist etwas faul.

Spektrum: Können Sie denn mit den Leuten ungehindert reden?

Kraatz-Wadsack: Jeder von uns Inspektoren hat einen irakischen Aufpasser dabei. Jede Handlung, jede Konversation wird beobachtet und gelegentlich auch unterbunden.

Spektrum: Welche Behinderungen haben Sie erlebt?

Kraatz-Wadsack: Einmal, in einem Luftwaffenhauptquartier, wollte ich den Inhalt eines Safes überprüfen. Der irakische Aufpasser meinte, der Inhalt würde nicht in das Mandat der Inspektoren fallen. Gut, entgegnete ich, aber ich muss überprüfen, ob das stimmt. Im Safe lagen viele luftwaffenspezifische Dokumente, das sagte mir mein Dolmetscher. Dann aber sehe ich eine Mappe, auf der steht: Irak – Iran. Das Dokument war arabisch, aber ich konnte erkennen, dass es sich um Spezialmunition handelte. Und dann lese ich etwas über Chemiewaffen, die im Krieg gegen den Iran eingesetzt wurden. Während mir mein Dolmetscher übersetzte und ich Notizen machte, holte sich der irakische Aufpasser, der selbst die Signifikanz des Dokuments nicht erkannt hatte, per Telefon Anweisungen aus Bagdad. Dann nahm er uns das Dokument weg. In solchen Situationen nützt es wenig, wenn Sie die Resolution des Sicherheitsrates rezitieren.

Spektrum: Bleibt Ihnen dann nur der Anruf in New York?

Kraatz-Wadsack: Nicht bei allen Behinderungen geht gleich die ganze Kommandokette durch. Es kommt auf das Pro- ▶



UNSCOM, UN PHOTO LIBRARY

Mitglieder der United Nations Special Commission (UNSCOM) inspizieren mit Senfgas gefüllte Bomben, die der Irak offen gelegt hat.

blem an. Wir als Inspektoren machen zunächst einen Faktenbericht. Beispiel: Ankunft vor Ort um 8.10 Uhr. Eintritt durch den Irak ermöglicht um 8.40 Uhr. Grund: Der zuständige Mann mit dem Schlüssel war nicht auffindbar. Der Chairman unserer Kommission macht die politische Bewertung. War es eine Behinderung oder nicht? Unmittelbarer Eintritt heißt ja nicht unbedingt sofort. Es gibt schon vernünftige Gründe für eine Verzögerung. Wenn es eine militärische Einrichtung ist, dann brauchen wir den Kommandanten – auch unsere irakischen Begleiter sind nicht autorisiert, da einfach reinzustürmen. Man muss seinen gesunden Menschenverstand walten lassen. Bei schwerwiegenden Behinderungen gibt der Chairman die Informationen an den Sicherheitsrat weiter. Etwa, wenn wir zehn Minuten lang keinen Zutritt haben, und derweil rennen die Leute hinten aus dem Gebäude raus.

Spektrum: Ist denn der Schlüssel ein generelles Problem?

Kraatz-Wadsack: Ja, absolut. Es gibt immer einen, der die Schlüsselgewalt hat, und der ist meistens nicht da oder nicht auffindbar. Deshalb haben wir immer unser Brecheisen dabei. Das bieten wir den Irakern an. Schließlich sind sie es, die uns jederzeit ungehindert den Zutritt verschaffen müssen. Und siehe da: Meistens taucht dann der Schlüssel irgendwoher auf. Das ist alles Verzögerungstaktik.

Spektrum: Müssen Sie denn nicht befürchten, bei ihren Handlungen in Misskredit gebracht zu werden?

Kraatz-Wadsack: Das wurde mehrfach versucht. Die Iraker haben immer einen Kameramann dabei. Der ist sehr trickreich und versucht, uns in schlechter Situation zu filmen. Manche Szenen werden dann aus dem Zusammenhang gerissen und an Fernsehsender verkauft. Einmal wollten wir in ein Universitätsgebäude, und der Schlüssel war partout nicht aufzufinden. Aber ein Fenster war offen. Da sagten sie: Bitte nicht das Schloss aufbrechen, könnt ihr nicht durchs Fenster? Da hab ich gesagt: Können wir schon, aber nur, wenn du die Kamera zur Seite legst. Als Inspektor muss man darauf achten, nicht vorgeführt werden zu können. Aber auch wir haben eine Kamera, um den Vorgang zu filmen. Einen solchen Gegenfilm haben wir schon gedreht, wenn wir durchs Fenster mussten.

Spektrum: Und wie gehen Sie bei besonders sensitiven Einrichtungen vor wie etwa bei religiösen Gebäuden oder den so genannten Präsidentenpalästen?

Kraatz-Wadsack: Was kulturelle oder religiöse Empfindlichkeiten betrifft, da können unsere arabischen Übersetzer weiterhelfen. Die könnten auch allein in eine Moschee hineingehen; die wüssten schon, auf was sie achten müssen. Für die Präsidentenpaläste gab es bisher ein *memorandum of understanding*: Inspektionen wurden nur als Rundgang durchgeführt, und es waren Diplomaten dabei. Der Inspektionswert war gering. Dann gibt es tatsächlich noch so genannte sensitive Einrichtungen, für die zusätzliche Modalitäten gelten. Der Irak entscheidet, welche Einrichtung sensitiv ist.

Spektrum: Was bedeutet das für Ihre Praxis?

Kraatz-Wadsack: Es gibt zwei wesentliche Unterschiede zu den normalen Inspektionen. Erstens: Reduktion des ursprünglichen Inspektionsteams auf ganz wenige Experten. Wir kommen mit 44 Leuten, die Iraker sagen: Ihr kommt nur mit zehn Leuten rein. Dann verhandeln wir. Das ist wie auf dem Basar – und wir verschwenden Zeit. Zweitens: Es muss noch ein hoher Repräsentant des Irak anreisen, der uns auf den Inspektionen begleitet. Der kann natürlich seine Anreise verzögern. Wir müssen warten. Immerhin muss während dieser Zeit die sensitive Einrichtung „einfrieren“: keinerlei Aktivität mehr, kein Autoverkehr, nichts darf raus. Unsere Hubschrauber kontrollieren das von oben. Wir haben schon mal beobachtet, wie Lastwagen rausfuhren, beladen mit riesigen Geräten. Unser Kameramann im Hubschrauber wollte das filmen. Der irakische Aufpasser an Bord war damit nicht einverstanden und wandte sogar physische Gewalt an. Das war einer der Fälle, wo der Sicherheitsrat umgehend mit einer neuen Resolution reagierte.

Spektrum: In Kürze wird es wohl zu neuen Inspektionen kommen. Müssen Sie befürchten, dass das Katz- und Mausspiel genauso weitergeht?

Kraatz-Wadsack: Als UNSCOM im Dezember 1999 aufgelöst und UNMOVIC als Kontrollkommission etabliert wurde, hat der Irak diese Resolution gar nicht anerkannt – wir hatten zwar eine neue Kommission, aber keinen Zutritt. Jetzt, nach fast vier Jahren, sagt der Irak, die Inspektoren können ungehindert zurückkehren. Wichtig ist aber: Können wir auch ungehindert inspizieren? Das wird sich erst herausstellen, wenn wir dort sind. Vor Ort wird sich relativ schnell zeigen, wie Husseins Angebot wirklich einzuschätzen ist.

Spektrum: Ihrer Auffassung nach könnte sich der Versuch neuer Inspektionen lohnen?

Kraatz-Wadsack: Oh ja. Wir haben jetzt weit mehr Informationen als früher, insbesondere durch Satellitenaufnahmen. Die zeigen, dass viele der im Dezember 1998 zerstörten Einrichtungen wieder aufgebaut worden sind. Da müssen wir hin, um reinzuschauen. Auch bei den Gebäuden, die wir inspiziert hatten, wissen wir nicht, ob sie noch die gleiche Funktion haben wie früher. Aus unseren früheren Erkenntnissen können wir zwar abschätzen, welches Potenzial der Irak hat. Aber was hat er in den vergangenen vier Jahren tatsächlich gemacht? Hat er Massenvernichtungswaffen produziert und nun die Spuren verwischt? Das sehen wir erst, wenn wir in die Gebäude hineingehen.

---

*Das Interview führte **Uwe Reichert**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

MEDIZIN

Narbenlose Wundheilung


Björn Stark


Jeffrey A. Hubbell

KÖRBER-STIFTUNG

Der mit 750 000 Euro dotierte Körber-Preis für die europäische Wissenschaft ging in diesem Jahr an ein internationales Forscherteam, das ein neuartiges Material für den Verschluss von Wunden entwickeln will. Zu den Preisträgern gehören auch der Mediziner Björn Stark von der Universitätsklinik Freiburg und Jeffrey A. Hubbell vom Institut für Biomedizinische Technik der Universität Zürich und der ETH Zürich.

Mit dem neuen Wundverschluss könnte vielen Betroffenen erheblich besser geholfen werden: Opfer von Verbrennungen haben oft großflächige Hautwunden, die nur unter hässlicher Narbenbildung abheilen. Diabetiker und Patienten mit Venenleiden werden vielfach von chronisch offenen Hautstellen gepeinigt. Herzpatienten, denen künstliche Blutgefäße aus Kunststoff, so genannte Bypässe, eingesetzt wurden, müssen das Zuwachsen der neuen Gefäße befürchten. Denn in den künstlichen Röhren können sich Zellen ansiedeln, die sich dann ungehemmt vermehren. Durch das neue Material soll sich eine normale Gefäßwand bilden, in der keine unkontrollierte Zellteilung mehr stattfindet.

Die innovative Idee entstand durch eine erstaunliche Beobachtung: Verletzungen, die während einer Operation an Maus-Embryonen entstehen, heilen perfekt ohne Narbenbildung. Dasselbe trifft auch für menschliche Feten zu. Durch eingehende Untersuchung dieses Phänomens konnte die Beteiligung spezieller Wachstumsfaktoren an diesem Prozess nachgewiesen werden. Das sind Signalmoleküle, die der Körper bildet, um Vermehrung und Wachstum bestimmter Zellen anzuregen. Eingebettet in die Grundsubstanz Polyethylenglykol, einen gelartigen Kunststoff, sollen die Signalmoleküle künftig auch die Körperzellen eines erwachsenen Organismus anregen, sich selbst zu heilen, ohne dass Narben zurückbleiben. Dafür wird das Forscherteam Erkenntnisse aus Medizin, Biologie, Chemie und Materialforschung zusammenbringen: Stark gilt als führend auf dem Gebiet der Hautzellkulturen. Hubbell leitet die größte Gruppe für biomedizinische Materialforschung in Europa.

Die private Körber-Stiftung wurde 1984 von dem Unternehmer Kurt A. Körber ins Leben gerufen. Die Bezeichnung „Hamburger Nobelpreis“, wie der Körber-Preis auch genannt wird, unterstreicht zwar seine Bedeutung, ist aber nicht sehr treffend. Denn während der Nobelpreis für Forschungsergebnisse verliehen wird, prämiert der Körber-Preis ein viel versprechendes Projekt. So soll die Verwirklichung zukunftsträchtiger wissenschaftlicher Ideen erleichtert werden.

PHYSIKALISCHE CHEMIE

Höhere Waschkraft dank Neutronenforschung

Erwin Schrödinger ist nicht nur der „Vater der Wellenmechanik“. Der Physiker spielte auch bei einer weiteren wissenschaftlichen Revolution des 20. Jahrhunderts den Geburtshelfer: Er entwickelte die Idee, dass genetische Information in Makromolekülen gespeichert wird – also das Konzept der DNA, das die Biologie nachhaltig prägte.

Schrödingers interdisziplinärer Brillanz fühlt sich auch der nach ihm benannte Wissenschaftspreis des Stifterverbandes verpflichtet, der in diesem Jahr an ein fünfköpfiges Team von Physikern und Chemikern geht: Jürgen Allgaier, Gerhard Gompper und Dieter Richter vom Institut für Festkörperforschung des Forschungszentrums Jülich sowie Thomas Sottmann und Reinhard Strey vom Institut für Physikalische Chemie der Universität zu Köln.

Die Preisträger fanden auf ungewöhnlichem Wege eine Lösung für ein altes Problem. Mit Hilfe eines Neutronen-Streuexperiments erarbeiteten sie die Wissensbasis, mit der sich nun die schwierige Vermischung von Öl und Wasser beträchtlich verbessern lässt: Es gelang ihnen, die Effizienz von Tensiden um ein Vielfaches zu erhöhen. Diese Substanzen sind grundlegender Bestandteil von Wasch- und Reinigungsmitteln, werden aber auch in der Kosmetik- und Pharmaindustrie eingesetzt.


HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Die Erwin-Schrödinger-Preisträger aus Jülich und Köln entwickelten einen hocheffizienten Zusatzstoff für Waschmittel.

Ursprünglich wollten die Forscher die Struktur langkettiger Polymere untersuchen. Vermischt mit Tensiden, so zeigte sich, steigern sie deren Effizienz bei der Vermischung von Öl und Wasser enorm. Doch was genau bewirken die Polymere in einer solchen Emulsion?

Um das zu klären, ersetzten die Forscher zunächst die Wasserstoffatome von Öl und Wasser durch Deuterium (schweren Wasserstoff). Neutronenstrahlen, die auf die Probe geschossen werden, können dann zwischen den Polymeren und der modifizierten Emulsion „unterscheiden“.

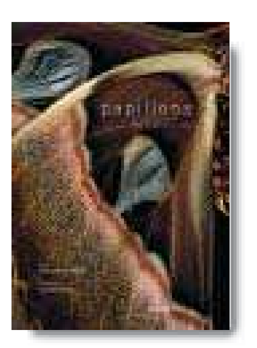
Die Resultate ergaben: Das Polymer setzt an der Grenzfläche zwischen Öl und Wasser an und glättet sie. Die Grenzfläche ist also viel kleiner als in gewöhnlichen Emulsionen, wo sie stark „gefaltet“ ist. Damit sinkt auch die Zahl der benötigten Tenside, die an der Grenzfläche ansetzen, um die gewünschte Verbindung von Öl und Wasser herzustellen.

In der Praxis können die Resultate der Forscher zu deutlich geringeren Kosten und einer geringeren Umweltbelastung durch Tenside führen; auch das hinzugefügte Polymer ist biologisch abbaubar.

ZOOLOGIE

Jean-Pierre Vesco (Text), Paul Starosta (Bilder)
Papillons
Die Schönheit der Schmetterlinge

Aus dem Französischen von Cornelia Sevrain.
Knesebeck, München 2001. 183 Seiten, € 49,90



Die zerbrechliche Schönheit der Schmetterlinge und ihre geheimnisvolle Verwandlung aus einer Raupe haben den Menschen seit jeher fasziniert. Bildbände über diese zarten Geschöpfe haben Tradition seit den Tagen der hochbegabten Naturforscherin und Kupferstecherin Maria Sibylla Merian (1647–1717) und ihrem Lebenswerk, den „Insekten-Metamorphosen“ von 1705.

So wie sie einst in Surinam die Schmetterlinge und ihre Wirtspflanzen „nach dem Leben“ zeichnete, hat der französische Biologe und Fotograf Paul Starosta ausschließlich lebende Exemplare von exotischen wie heimischen Tag- und Nachtfaltern porträtiert. Sämtliche der eindrucksvollen Makroaufnahmen sind vor einem schwarzen Hintergrund entstanden, der den Bildern eine besondere Strahlkraft verleiht. Die wundersame Verwandlung vom winzigen Ei über die sich mehrfach verpuppende Raupe bis hin zum farbenfrohen Falter ist in Bilderserien festgehalten. Ein leicht verständlicher Text von Jean-Pierre Vesco vermittelt Einblicke in die vielfältigen Geheimnisse des Schmetterlingslebens.

Professionelle Entomologen werden hier einige Arten erstmals abgebildet finden. Dabei wollen die Autoren keine Unterrichtsstunde in Insektenkunde abhalten; vielmehr verschaffen sie insbesondere dem Neuling staunenswerte Einblicke.

Die fotografischen Fähigkeiten und den Detailblick eines Paul Starosta würde man sich für andere, kaum bekannte und auf den ersten Blick weniger fotogene Wirbellose wünschen. Die muschelähnlichen Armfüßer und die kleinen, aber durchaus farbenprächtigen Stummelfüßer würden sicherlich ebenso schöne Bildbände füllen.

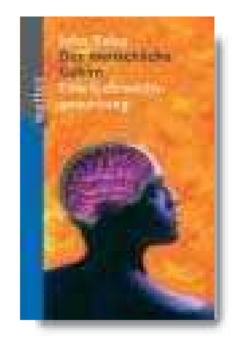
Matthias Glaubrecht

Der Rezensent ist promovierter Zoologe und Kurator am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität Berlin.





Raupen des Spitzwegerichfalters *Melitea cinxia* (links) und des südamerikanischen Pfauenspinners *Automeris harrissorum* (rechts)



HIRNFORSCHUNG

John J. Ratey
Das menschliche Gehirn
Eine Gebrauchsanweisung

Aus dem amerikanischen Englisch von S. Schuhmacher, R. Seuß und C. Trunk. Walter, Düsseldorf 2001. 478 Seiten, € 34,90

Zusammenhänge zu begreifen, die vernetzt und in sich rückbezüglich sind, fällt dem menschlichen Verstand schwer. Unser Denken sucht nach einfachen Regeln, linearen Kausalitäten und scheitert bereits bei sehr geringen Graden von Rekursivität. Schon was in einem künstlichen neuronalen Netz aus wenigen Schichten und ein, zwei Rückkopplungen abläuft, kann ein Forscher zwar ausrechnen lassen, aber nicht gedanklich nachvollziehen. Was im menschlichen Gehirn mit seinen Abermilliarden kreuz und quer untereinander vernetzten Neuronen geschieht, entzieht sich dem Verständnis eben dieses Gehirns vollständig. Unser Denkorgan, so scheint es, ist nicht dazu geschaffen, sich selbst zu ergründen.

Mindestens aber, so meint John J. Ratey, Professor für Psychiatrie an der Harvard Medical School, wird es mit herkömmlichen Konzepten nicht gelingen. Was wir bräuchten, seien neue, gewagte und zunächst gewöhnungsbedürftige Metaphern, um neue Denkweisen zu etablieren. Und er kündigt solch eine metaphorische Herangehensweise im Verlauf des Buches an. Ob er damit Recht und womöglich Aussicht auf Erfolg hat, sei dahingestellt. Der Versuch, der Komplexität des Gehirns mit einer selbst erfundenen, poetischen Redeweise nahe zu kommen, wäre jedenfalls ein sehr spannendes Unterfangen gewesen.

„Wir brauchen neue, gewagte und zunächst gewöhnungsbedürftige Metaphern“

Doch nichts von alledem. Nach der Einleitung macht Ratey sich zunächst auf, das ganze riesige Feld der Hirnforschung zu pflügen. Er reißt die Gehirnentwicklung ab, ackert sich durch Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Bewegung, Gedächtnis, Gefühle, Sprache, aber er kratzt dabei nur an der Oberfläche und fördert keinen der Schätze zu Tage, die er versprochen hat.

Mehr noch: Im Kapitel „Entwicklung“ bekennt er sich zu Gerald Edelmans Theorie des „Neuronalen Darwinismus“ und stellt zwei Grund- und Leitsätze auf: „Gemeinsam feuernde Neuronen verschalten sich auch“ und „Was nicht benutzt wird, geht verloren“.

Dass diese Sätze nirgendwo fassungsloses Staunen oder wilde Begeisterung hervorrufen werden, ist nicht tragisch. Schlimm ist, dass weder Edelmans Theorie noch diese beiden – immerhin als „wichtigste Grundsätze des Buches“ bezeichneten – Aussagen auf den folgenden 400 Seiten je wieder eine Rolle spielen. Es gibt keinen roten Faden, kein leitendes Erkenntnisinteresse, keine Spannung, keinen Vorwärtstrieb. Selbst die titelgebende Idee mit der Gebrauchsanweisung, aus der man durchaus etwas hätte machen können, kommt nie wieder vor. Nirgendwo auch nur ein Schimmer von Brillanz, nirgends eine eigene Idee. Die Führung durch das spannendste Organ unseres Körpers wird schon bald quälend langweilig. Ratey hat nichts zu sagen. Aber er hat ein großes Mitteilungsbedürfnis.

Dabei ist seine Darstellung der Neuropsychologie durchaus kundig und umfassend. Ratey kennt sein Fach, er ist in vielen Forschungsbereichen auf dem neuesten Stand und versteht offensichtlich, wovon er redet – auch wenn häufige Unsauberkeiten oder kleine Fehler die Lektüre ärgerlich machen. Für ein Lehrbuch oder eine Einführung jedoch ist die Fülle kurzer Abschnitte zu unübersichtlich; selbst innerhalb eines Kapitels ist keine Linie zu erkennen. Ratey bietet Wissensbrocken, keine Zusammenhänge. Überdies sind die Grafiken für ein Lehrbuch viel zu spärlich und auch nicht sonderlich instruktiv.

Kurz vor Schluss immerhin kommt Ratey doch noch dazu, eine neue, eigene Metapher für die Arbeitsweise des Gehirns vorzustellen: Die vier Funktionsbereiche des Gehirns – „Wahrnehmung“, „Aufmerksamkeit, Bewusstsein, Kognition“, „Zentralfunktionen“ sowie „Identität und Verhalten“ – seien vier Theater, die in genannter Reihenfolge an einem Fluss liegen, auf welchem die Information fließt. Diese Verquickung zweier Bildwelten, die nichts miteinander zu tun haben, ist beinahe komisch. Und es wird nicht klar, weshalb Ra- ▶

tey Theater gewählt hat, denn die Aspekte von Bühne und Beobachter, die dem „kartesianischen Theater“ einen Platz in der Neurophilosophie verschafft haben, spielen bei ihm überhaupt keine Rolle. Vor allem aber ist die Linearität eines Flusses als Bild für das hochgradig rekursive Gehirn denkbar unangemessen. Ratey braucht nicht einmal eine Seite, um das selbst zu bemerken und die Metapher durch unmögliche Zusatzannahmen (aufwärts fließende Ströme) so zu zerhauen, dass man sich fragt, warum er sich nicht von vornherein etwas Besseres ausgedacht hat.

Wenn so die versprochene neue Metaphorik aussieht, dann werden wir das Gehirn wohl nie verstehen.

Konrad Lehmann

Der Rezensent ist promovierter Neuroanatom und arbeitet an der Universität Bielefeld über die Entwicklung der Gehirnstruktur von Säugetieren.

PHYSIK

Robert Gilmore

The Wizard of Quarks

A Fantasy of Particle Physics

Copernicus Books, New York 2001.
200 Seiten, $ 24,– (€ 29,50)

Aus irgendeinem unerklärten Grund fällt Dorothys U-Bahn-Zug hinab in die Quantenwelt der Teilchen. Dort wollte das junge Mädchen nie hin. Doch ohne Scheu tritt sie in den Mikrokosmos, um sich auf den Rückweg zu machen. Der führt Dorothy quer durch eine Fantasiewelt der gesamten Elementarteilchenphysik. Sie sieht Wellenfunktionen in Form von Interferenztänzern und einen Garten, in dem Atome wachsen, sie schaut bei einem unendlich ausufernden Spiel um das richtige Feynman-Diagramm zu und spürt die Wirkung eines Feldes virtueller Photonen.

Diese komplizierte und unanschauliche Welt muss sie zum Glück nicht alleine durchstreifen. Unterwegs trifft sie immer wieder fabelhafte Gestalten, die sich bestens mit den Quantengegebenheiten auskennen und ihr geduldig das Erlebte erklären. So lernt sie etwa die vier Hexen der grundlegenden Wechselwirkungen kennen (das Bild zeigt die elektromagnetische Hexe) oder den Inspektor, der für die korrekten Massen und Größen von Atomkernen zuständig ist. Drei der Wesen schließen sich sogar Dorothys Spaziergang an – eine Vogelscheuche, ein Blechcomputer und ein penetrant besserwisserischer Löwe. Den richtigen Weg weist ihr schließlich der Wizard of Quarks, der trotz seines imposanten Namens doch nur ein freundlicher, älterer Herr ist.

Das klingt nach einer guten Idee für ein Buch. Der Physiker Robert Gilmore, der an der Universität Bristol (England) arbeitet, hat sie hier umgesetzt. Aber für wen? Wem kann man auf gerade einmal 200 Seiten im Plauderton das Standardmodell der Teilchenphysik erklären?

Wer es schon kennt, freut sich über manche nette Veranschaulichung. Etwa wenn Gilmore Dorothy eine Energiebrille aufsetzt und sie statt einer Elektronenwolke um ein Atom die Elektronen schön auf die einzelnen Energieniveaus einsortiert sieht. Oder wenn er neuere, spekulative Theorien als Babys beschreibt. Das berühmteste Beispiel Supersymmetrie ist in dem Bild ein Teenager, der die Wiege einfach nicht verlassen will.

Eine breitere Leserschaft ohne Vorkenntnisse wird sein Buch jedoch kaum verstehen. Das verhindern stellenweise einfach handwerkliche Fehler. So erklärt der oben genannte Inspektor den Massendefekt von Atomkernen korrekt über die Bindungsenergie. Aber erst zehn Seiten später erfährt der Leser von der Einstein'schen Äquivalenzbeziehung zwischen Energie und Masse. Störend ist weiter, dass Gilmore nur selten die relativen Größen der einzelnen Phänomene anschaulich macht, obwohl Dorothy auf ihrer Wanderung an Quarks, Atomen, den Detektorhallen des europäischen Teilchenphysik-Labors Cern in Genf und sogar an Sternen vorbeikommt.

Wenn der Leser die Sprünge um mehrere Größenordnungen mitmacht, kann er mit Dorothy erleben, wie die Quantenobjekte aussähen, wenn wir sie bis in den gewohnten Alltagsbereich vergrößern könnten. Natürlich kann Gilmore dabei nicht alles in der quantenmechanischen Unschärfe verschwimmen lassen. Stattdessen verhält sich seine Märchenwelt eigentlich ganz normal, nur die jeweils gerade besprochenen Phänomene zeigen die ungewohnten Eigenschaften kleinster Teilchen. Dieser Kunstgriff kann aber auch verwirren. Woher soll der Leser wissen, welche Konzepte wann wichtig sind? So spüren die vier Spaziergänger je nach dramaturgischem Bedarf einmal hautnah ein Feld virtueller Photonen, sehen elektrische Feldlinien oder Feynman-Diagramme. An keiner Stelle weist Gilmore darauf hin, dass viele der Bilder nur Modelle veranschaulichen. Das ist bedenklich, denn dass Modelle oft nur bedingt etwas mit der Realität zu tun haben, verschweigt er ebenfalls.

Der stärkste Kritikpunkt ist allerdings, dass Gilmore viel zu viel Information in sein Buch packt. Es bleibt wenig Platz für einzelne Aspekte. So werden die Effekte der speziellen Relativitätstheorie auf dreieinhalb Seiten besprochen, und die Mischung der einzelnen Quarksorten in der schwachen Wechselwirkung wird auf gerade einmal einer halben Seite abgehandelt. Das ist dann nicht nur unanschaulich (was die Quantenphysik ja von sich aus ist), sondern auch noch unverständlich. Außerdem leidet der Stil durch die zu hohe Stoffdichte. Gilmores Buch ist eher eine Zusammenstellung von Monologen als ein Märchen. Herausgekommen ist eine Geschichte ohne echte Handlung mit flachen Charakteren, die sich kaum besser als ein gewöhnliches Sachbuch liest. Literarisch wertvoll ist das bestimmt nicht, und warum die arme Dorothy das alles erleben muss, bevor sie zurück in die gewöhnliche Welt darf, erschließt sich am Ende auch nicht. Wahrscheinlich hat sie aber auf lange Zeit genug von der Teilchenphysik – und mit ihr der Leser.

Stefan Gillessen

Der Rezensent promoviert am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg über ein Thema aus der Astroteilchenphysik.



BILDUNG

Peter Watson
Das Lächeln der Medusa
Die Geschichte der Ideen und Menschen, die das moderne Denken geprägt haben
Bertelsmann, München 2001. 1183 Seiten, € 49,–

Bildung ist in. Wer heute auf dem Arbeitsmarkt bestehen will, muss Allgemeinbildung besitzen, nicht nur Spezialwissen. Im Fernsehen fragen Quiz-Shows Bildungsbrocken ab. Ein Bestseller verkauft sich mit dem patzigen Titel: „Bildung. Alles, was man wissen muss“. Sein Autor, der Anglist und Romancier Dietrich Schwanitz, zählt freilich die Naturwissenschaften nicht zu dem, „was man wissen muss“ – oder was er unter Bildung versteht. Darauf reagierte der Biologe Ernst Peter Fischer mit seinem Buch: „Die andere Bildung. Was man von den Naturwissenschaften wissen sollte“. Damit ist die schlechte alte Trennung der „zwei Kulturen“ wieder einmal zementiert: hier die musisch-literarisch-geisteswissenschaftlich Gebildeten, dort die empirisch-technisch-naturwissenschaftlichen Forscher.

Es gibt aber neuerdings einen interessanten Versuch, ein Panorama heutigen Wissens zu entwerfen, das dieser Trennung bewusst widerspricht und die Bedeutung der Naturwissenschaften für die moderne Kultur besonders hervorhebt. Der britische Publizist Peter Watson legt eine Ideengeschichte des 20. Jahrhunderts vor, durch die sich als roter Faden der Einfluss der Naturforschung auf die Moderne zieht: „Viele Strömungen, sogar in der bildenden Kunst – Kubismus, Surrealismus, Futurismus, Konstruktivismus, selbst das Abstrakte –, waren Antworten auf naturwissenschaftliche Erkenntnisse (oder das, was die Künstler dafür hielten). Und auch Schriftsteller wie Joseph Conrad, D.H. Lawrence, Marcel Proust, Thomas Mann, T.S. Eliot, Franz Kafka, Virginia Woolf oder James Joyce – um nur einige zu nennen – wussten, was sie Darwin, Einstein, Freud und all den anderen schuldeten. Die Musik und der moderne Tanz waren unübersehbar von Atomphysik und Anthropologie beeinflusst (was nicht zuletzt der Komponist Arnold Schönberg selbst eingestand). Der Ausdruck ‚elektronische Musik‘ spricht für sich. Ob in den Rechtswissenschaften, der Architektur, Religion, den Erziehungswissenschaften, Wirtschaftswissenschaften oder bei der Organisation von Arbeit, überall haben sich die Erkenntnisse und Methodologien der empirischen Wissenschaften als unverzichtbar erwiesen.“

Schon das Zitat aus der Einleitung lässt Stärken und Schwächen von Watsons Vorgehen ahnen. Immer wieder zieht Watson überraschende Verbindungslinien über die traditionellen Bildungsgrenzen hinweg und versetzt den Leser in einen Geschwindigkeitsrausch beim Überfliegen von Wiener Caféhäusern, Pariser Ateliers, amerikanischen Universitäten, britischen Labors, deutschen Filmateliers oder russischen Revolutionszirkeln. Ein Wimmelbild der Moderne entsteht, in dem der Autor und mit ihm der Leser vom Hundertsten ins Tausendste gerät – begeistert, neugierig, überrascht, oft auch nur verwirrt.

Schönbergs Musik war von der Atomphysik beeinflusst

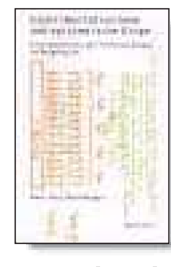
Denn allzu oft wird die Höchstgeschwindigkeit überschritten. Bei dem Tempo, mit dem Watson über Entdeckungen, Gedanken und Kunstwerke hinwegrast, sind manchmal nur vage Umrisse zu erkennen. Vor allem Philosophen erscheinen als Verrückte, wenn ihre Ideen im Telegrammstil auf ein paar Behauptungen reduziert werden. Watson bekennt freimütig, sich bei den dargestellten Denkern und Schriftstellern auf jeweils ein, zwei Werke der Sekundärliteratur gestützt zu haben. Natürlich konnte er nicht die Originalarbeiten aller Erwähnten studieren, aber bei Gedanken aus zweiter Hand ist das treffende Zusammenfassen von Zusammenfassungen Glückssache.

Um den Leser bei der Stange zu halten, greift Watson gern zu dem journalistischen Trick, handfeste Details einzustreuen. Sie sind oft erhellend und verblüffend, manchmal aber falsch. In einer sehr einfühlsamen Darstellung von Robert Musils Roman „Mann ohne Eigenschaften“ heißt es: „Kaum hatte Musil sein großes Werk beendet, starb er 1942 vollständig erschöpft“ – aber Musil beendete sein Werk nie, sondern hinterließ ein Romanfragment, an dem er noch am Tag vor seinem Tod arbeitete. Watson erwähnt, dass Franz Kafka keinen seiner Romane vollendete, streut aber die so anfechtbare wie überflüssige Bemerkung ein, das „Schloss“ sei Kafkas „meist verkauftes Buch“. In diesem Stil versucht er jeder seiner unzähligen Personen mehr oder weniger glücklich Profil zu verleihen.

Es ist eine großartige Idee, das 20. Jahrhundert im Rückblick als gigantisches Gedankenlabor zu beschreiben. Doch die Aufgabe überschreitet die Fähigkeit eines Einzelnen bei weitem. So musste Watsons Mammutwerk eine groß angelegte Skizze bleiben, der erste Entwurf einer recht eigenwillig kolorierten Landkarte, in der nicht jede Straßenkreuzung stimmt. Wer sich aber von Watsons unerschöpflichem Wissensdurst anstecken lässt und hier und da auf eigene Faust den Originalquellen nachgeht, wird dem Autor für seine vielen Wegweiser dankbar sein.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Hans-Jörg Rheinberger
Experimentalsysteme und epistemische Dinge
Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas
Wallstein, Göttingen 2001. 344 Seiten, € 29,–

Hans-Jörg Rheinberger, Direktor des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte in Berlin, erzählt einerseits die Geschichte einer speziellen Forschungsstätte, des Labors für Krebsforschung der Harvard University am Massachusetts General Hospital (MGH) in Boston. Andererseits misst er, in Kapiteln, die mit den erzählenden alternieren, an dieser Realität gängige Vorstellungen von der Rolle des wissenschaftlichen Experiments. Die doppelte Thematik entspricht der Vorbildung Rheinbergers, der sich als Molekularbiologe wie als Übersetzer der französischen Gegenwartsphilosophie einen Namen gemacht hat.

Held der Geschichte ist der Laborleiter Paul C. Zamecnik. 1936 an der Harvard Medical School zum Doktor der Medizin promoviert, begann er sich während des Krieges für die Biochemie zu ▶

interessieren und wandte sich 1945 der Krebsforschung zu.

In einer Zeit, als die amerikanischen Krebsforscher mangels anderer Mittel vor den Kinos Spenden für ihre Untersuchungen sammelten, gelang es Zamecnik, damals Schriftführer im Forschungskomitee am MGH, die Atomic Energy Commission als Geldquelle zu erschließen. Er reichte selbst Forschungsanträge ein, in denen radioaktiv gekennzeichneten Molekülen eine besondere Bedeutung zukam. Eine wichtige Folge der Experimente mit der radioaktiven Tracer-Technik war, dass man in Boston anstelle von lebendem Rattengewebe zunehmend homogenisierte Extrakte von Rattenleber in Reagenzgläsern untersuchte.

Schon früh wandten Zamecnik und seine Mitarbeiter ihr Augenmerk auf Zwischenprodukte bei der Proteinsynthese. In den Laborbüchern vom November 1955 finden sich Hinweise, dass bei der Proteinsynthese ein zweistufiger Prozess anzunehmen ist. Rückblickend kann man feststellen, das dies ein erster Hinweis auf die Transfer-RNA war, jene kleinen RNA-Moleküle, die bei der Proteinsynthese die Übersetzung von Basentripletts in Aminosäuren realisieren. Rheinberger hebt hervor, dass diese Entdeckung ein unvorhergesehenes Ereignis war, das ans Licht trat, weil Zamecnik sich an das „Symmetrieprinzip“ hielt. Es verlangt Gegenproben, in diesem Fall den Wechsel einer Versuchsreihe mit radioaktiv markierten Aminosäuren und einer Reihe mit nicht markierten.

Institutionelle Verpflichtungen und konzeptuelle Barrieren hielten Zamecniks Team davon ab, die Bausteine, die sie hatten, zu einer Theorie der Proteinsynthese zusammenzufassen und damit eine Brücke zur Molekularbiologie zu schlagen. Gleichwohl bewertet Rheinberger die Tätigkeit des Labors als sehr erfolgreich. Nicht weil Zamecnik und seine Mitarbeiter zum Beispiel die Funktionsweise des Ribosoms dargelegt oder etwa Tumorbildungen biochemisch oder molekularbiologisch erklärt hätten, sondern weil sie in einer bewegten und konkurrenzreichen internationalen Forschungslandschaft über zwanzig Jahre an einer Vielfalt von Fragen arbeiteten, die stets neue Aufgaben und Kompetenzen generierte.

Was sind die Gründen für diesen Erfolg? Rheinberger nennt an erster Stelle „Techno-Opportunismus“. Zamecnik fasste „jede sich anbietende Gelegenheit beim Schopfe“, um mit breitem Ansatz den biochemischen Grundlagen des Wachstums auf die Spur zu kommen.

Der negative Beiklang des Wortes wendet sich im Verlauf der Studie ins Positive. Denn einerseits überzeugt Rheinberger den Leser, dass lokale, und sei es opportunistisch geprägte, Laborgewohnheiten sich zu Techniken zu verdichten pflegen, die dann den Kern experimenteller Praxis bilden. Beispiele solcher Techniken sind neben der erwähnten Arbeit mit homogenisierten Leberextrakten die radioaktive Markierung von Aminosäuren und die Ultrazentrifuge. Anderseits kann gerade Opportunismus die Freiheitsliebe und Produktivität individueller Forschung sichern, solange Konsens über die Einhaltung praktischer Prinzipien besteht.

Als weitere Gründe für den erfolgreichen Laborbetrieb nennt Rheinberger

Das Geheimnis erfolgreicher Labortätigkeit: „Techno-Opportunismus“ als Garant für Produktivität der Forschung

Ausdauer und eine besondere Forschungsphilosophie. Zamecnik betrieb Forschung eben nicht mit dem Ziel, einen ersten Platz in der Wissenschaft zu erlangen, sondern achtete vielmehr darauf, dass seine Forscher selbstständig und an verschiedenen Fragestellungen arbeiteten.

Diese Philosophie impliziert eine Revision des Verständnisses von erfolgreicher Labortätigkeit, und hier liegt ein Clou in der vorliegenden Studie des Wissenschaftshistorikers. Rheinberger verzichtet aus gutem Grund darauf, die Laborgeschichte von Zamecnik an der Idee des allgemeinen Fortschritts in der Krebsbehandlung zu messen. Seine Auffassung von Wissenschaftsgeschichte nimmt Abstand von der Idee des allgemeinen Fortschritts zu Gunsten einer empirischen Betrachtung lokaler Gebräuche, die rückblickend zu bahnbrechenden Entdeckungen beigetragen haben, ohne sie für sich beanspruchen zu können.

Nils Röller

Der Rezensent ist promovierter Medienwissenschaftler und arbeitet am Vilém Flusser Archiv der Kunsthochschule für Medien in Köln.

Lieber tot und lebendig

Das richtige Zauberwort eröffnet den Zugang zu einer interaktiven Wunderwelt der Quantenmechanik.

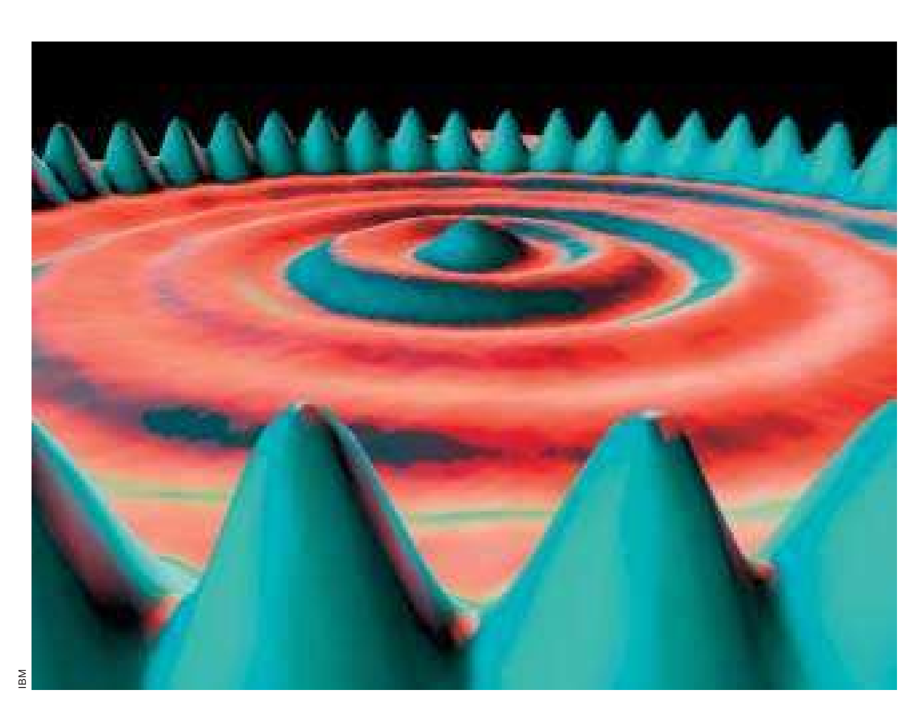
Von Thilo Körkel

Wellen benehmen sich im Quantenreich, als wären sie Teilchen, und Teilchen zerfließen in Wellen. Ein Quantenobjekt gibt entweder seinen Aufenthaltsort preis oder seine Geschwindigkeit – doch niemals beides zugleich.

Solche und andere Seltsamkeiten machen Dinge möglich, die in der klassischen Physik undenkbar sind. So etwa den verblüffenden „Bombentest“ von Avshalom Elitzur und Lev Vaidman (Spektrum der Wissenschaft 01/1997, S. 42): Der Auslöser einer gedachten Bombe ist so empfindlich, dass sie schon vom Hinschauen, sprich der Wechselwirkung mit einem einzelnen Photon, explodiert. Gleichwohl kann man mithilfe der Quantenmechanik „nachsehen“, ob die Bombe noch scharf ist – und zumindest mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit überleben. Erforschen lässt sich der Trick unter http://www.ati.ac.at/~summweb/ifm/pc_experiments/ifm/ifm.html (übrigens in einer harmlosen Variante, die Bomben durch lichtempfindliche Filme ersetzt).

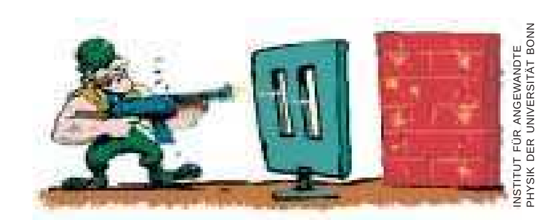
Ebenso überraschend ist auch das Verhalten von Elektronen beim Flug durch einen Doppelspalt, ein klassisches Beispiel für den „Welle-Teilchen-Dualismus“: Statt wie kleine Kugeln geradewegs durch den linken oder den rechten Spalt zu fliegen, erzeugen die Quanten auf einem Bildschirm dahinter ein Interferenzmuster, wie es eigentlich nur Wellen, nicht aber Teilchen hinterlassen dürften. Auf einer umfangreichen Seite für „Visual Quantum Mechanics“ (phys.educ.ksu.edu/vqm, Stichwort „Double Slit Diffraction“) wird das Phänomen simuliert. Das Internet birgt viele interaktive Schätze dieser Art – und sie enthüllen sich dem, der das Zauberwort für die Suchmaschinen kennt: „physlets“ für physikalische (Java-)Applets.

Viele virtuelle Quantenexperimente erfordern einiges an theoretischem Hintergrund. Dieser lässt sich im Internet ebenfalls auffrischen, etwa beim Blättern durch „milq“, ein Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in der Quantenmechanik (www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq). Gut eignen sich auch das multimediale Lernprogramm auf www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/grundl_d_tph/msm_qm/msm_qm_00.html und die interaktive (englischsprachige) Online-Vorlesung www.quantum-physics.polytechnique.fr.



IBM

Mithilfe des quantenphysikalischen Tunneleffekts machen Rastertunnelmikroskope selbst einzelne Atome sichtbar (www.almaden.ibm.com/vis/stm/corral.html). Hier zwingen 48 Eisenatome Oberflächenelektronen in kreisförmige Strukturen.



INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PHYSIK DER UNIVERSITÄT BONN

Wer mit Elektronen statt mit makroskopischen Objekten auf einen Doppelspalt ballert, findet an der Wand dahinter ein Interferenzmuster – als ob zwei Wellen gleichen Ursprungs durch die Spalte gegangen wären und sich überlagert hätten (www.iap.uni-bonn.de/P2K/schroedinger/two-slit3.html).

Quanten fürs Auge bietet www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/index.html, so zum Beispiel Animationen zur Quantentheorie und farbenprächtige Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms. Ein kleiner Seitensprung lohnt auch zu www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html. Die Seite gehört zum IBM-Forschungszentrum Almaden im Silicon Valley und führt stolz die Wunder der Rastertunnelmikroskopie vor (siehe die „Elektronen-Arena“ links unten).

Wer der Quantenphysik auch praktische Seiten abgewinnen will, wirft noch einen Blick auf www.ap.univie.ac.at/users/fe/Quantencomputer. Ein interaktiver Quantencomputer-Baukasten verdeutlicht dort das Prinzip, wie die Überlagerung von Quantenzuständen zu enorm schnellen Berechnungen genutzt werden kann (Spektrum der Wissenschaft 01/2002, S. 86).

„Schrödingers Katze“, das berühmte Haustier der Quantenphysiker, macht in einem Gedankenexperiment (anschaulich erklärt unter www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap6/k65p01.html) die einzigartige Erfahrung, gleichzeitig tot und lebendig zu sein. Physiker nennen dies eine Superposition von Quantenzuständen.

Ein Preisausschreiben im Scientific American lud jedermann dazu ein, sich dem viel diskutierten Phänomen auf unterhaltsame Weise zu nähern: mit einem Limerick (www.sciam.com/article.cfm?articleID=0002515F-1AA2-1C75-9B81809EC588EF21). Es gewann das folgende Werk, dessen Autor um des Reimes willen *statistics* mit *stat* abkürzte:

Schrödinger said that a cat
Is alive, or it's dead, and that's that.
But Heisenberg said,
„It's alive and it's dead,
and its state can be seen as a stat.“

Der Autor ist Diplom-Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

Nervöse Kippungen

von Pierre Tougne

Paul spielt gedankenverloren mit seinem kleinen Tetraeder, dessen vier Flächen rot, blau, gelb und grün sind. Zu Beginn liegt das Tetraeder mit der roten Fläche nach unten auf dem Tisch. Er kippt es stets rein zufällig über eine der drei Kanten, welche den Tisch berühren, sodass das Tetraeder auf eine der anderen Fläche zu liegen kommt.

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass die rote Fläche nach acht Kippungen wieder unten liegt?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn schwebende Kugelschreiber „U. F. O. Pen“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. November 2002, eingehen.

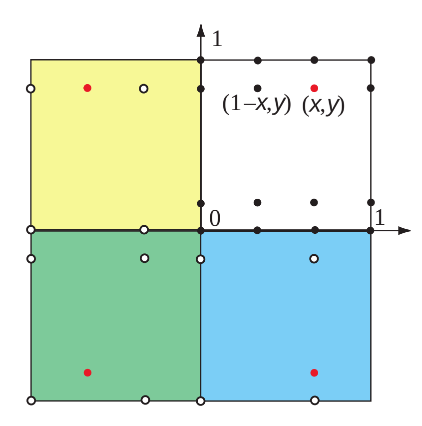
Lösung zu „Im Spiegelkabinett“ (September 2002)

Mit den fünfzehn eingezeichneten Blenden (schwarze Punkte im weißen Quadrat rechts) kann Paul alle seine Spiegelbilder vor seinem Blick verbergen, auch die, in denen er nur seinen (punktförmigen) Hinterkopf sieht.

Paul löst sein Problem, indem er die Illusion für Wirklichkeit nimmt: Er tut so, als sei die ganze Ebene mit Spiegelbildern seines Zimmers, Spiegelbildern dieser Spiegelbilder und so weiter bedeckt – genau das, was er in seinem Spiegelkabinett sieht. Er kümmert sich also nicht um den realen Zickzackweg des Lichtes, sondern um den Lichtweg in seiner Illusionswelt; der ist nämlich geradlinig und daher einfacher zu verstehen.

Dafür muss er sich mit unendlich vielen Spiegelbildern seiner selbst auseinander setzen. Wenn sein Zimmer so in der (x,y)-Ebene liegt, dass die Koordinaten jeweils von 0 bis 1 verlaufen, gibt es zunächst die Illusionszimmer durch Spiegelung an der linken Wand ($y=0$, gelb), der unteren Wand ($x=0$, blau) und an beiden nacheinander in beliebiger Reihenfolge (grün). Alle weiteren Illusionszimmer entstehen durch Verschiebung dieser vier Zimmer um ein Vielfaches von zwei Einheiten in x- und in y-Richtung.

Demnach hat Paul, der auf dem Punkt (x, y) steht, die unendlich vielen Spiegelbilder $(x+2k,\ y+2m)$ in den weißen Zimmern, $(-x+2k,\ y+2m)$ in den gelben, $(x+2k,\ -y+2m)$ in den blauen und $(-x+2k,\ -y+2m)$ in den grünen, wobei k und m alle ganzen Zahlen durchlaufen.



Diesen unendlich vielen Spiegelbildern muss er ebenso unendlich viele Blenden in den Weg stellen – in der Illusionswelt wohlgemerkt. Die müssen sämtlich Spiegelbilder von (endlich vielen) Blenden in der realen Welt sein. Die Spiegelbilder einer einzelnen realen Blende ergeben ein periodisches Muster, gleich dem Muster der Spiegelbilder von Paul selbst; also müssen die Blenden in der Illusionswelt ebenfalls in einem periodischen Muster angeordnet sein. Das gelingt, wenn Paul die Blenden in der Illusionswelt genau auf den halben Weg zwischen sich und sein jeweiliges Spiegelbild stellt, das heißt auf die Punkte $(x+k,\ y+m)$, $(k, y+m)$, $(x+k, m)$ und (k, m).

Welche realen Blenden in Pauls weißem Zimmer erzeugen nun diese Blenden in der Illusionswelt? Man kehre den oben beschriebenen Spiegelungsprozess um: Zuerst rückt man die Blenden wieder in das große Quadrat, indem man von beiden Koordinaten ein geeignetes Vielfaches von 2 abzieht. Das läuft darauf hinaus, für k und m die Werte 0 oder –1 einzusetzen. Dies ergibt die Punkte (x, y) (Paul selbst), $(0, y)$, $(x, 0)$ und $(0, 0)$ im weißen Zimmer, $(x-1, y)$, $(-1, y)$, $(x-1, 0)$ und $(-1, 0)$ im gelben, $(x, y-1)$, $(0, y-1)$, $(x, -1)$ und $(0, -1)$ im blauen sowie $(x-1, y-1)$, $(-1, y-1)$, $(x-1,-1)$ und $(-1, -1)$ im grünen.

Die Blenden (weiße Punkte), die nicht ohnehin schon im weißen Zimmer liegen, müssen durch Spiegelungen an der linken und/oder unteren Wand dorthin abgebildet werden. Daraus ergeben sich die 15 Blenden $(0, y)$, $(x, 0)$, $(0, 0)$, $(1-x, y)$, $(1, y)$, $(1-x, 0)$, $(1, 0)$, $(1-x, 1-y)$, $(1, 1-y)$, $(1-x, 1)$ und $(1, 1)$.

Wie wird eigentlich ein Lichtstrahl reflektiert, der in eine Zimmerecke fällt? Damit es in unsere Illusionswelt passt, müsste er genau in sich zurückgeworfen werden. Damit wird sein Verhalten auch stetig, denn ein Lichtstrahl, der haarscharf neben die Ecke fällt, wird nach zweifacher Reflexion fast in sich selbst zurückgeworfen (bis auf eine kleine Parallelversetzung). Aber wir haben es nicht ausdrücklich gesagt. Bitte um Entschuldigung!

Kommt man mit weniger als 15 Blenden aus? Wenn Paul auf einem Punkt mit irrationalen Koordinaten stehen würde, bestimmt nicht! An Pauls sehr speziellem Standort ist jedoch überraschenderweise von den drei Blenden, die im Inneren des Zimmers stehen, eine entbehrlich.

Diese inneren Blenden sind diejenigen, deren Bilder im Illusionsraum auf halbem Wege zwischen Paul und seinen „weißen“ (in weißen Zimmern befindlichen) Spiegelbildern stehen. Auf diesen Sehstrahlen steht jedoch auf einem Sechstel oder einem Drittel des Weges mindestens noch eine Blende. Der Beweis ist in www.spektrum. de unter „Inhaltsverzeichnis“ bei diesem Rätsel zu finden. Lösungen mit 15 Blenden wurden als richtig gewertet!

Die Gewinner der zehn „Fraktalrucksäcke“ sind Roland Maier, Riemerling; Hartmut Fenner, Hamburg; Wolfgang Meier, Bochum; Bernd Rümmler, Göttingen; Georg Becker, Hürth; Erwin Schlatter, Zürich; Hermann Wegerle, Hanau; Reinhard Göller, Karlsruhe; Oliver Gronau, Herford; und Philip Nagel, Augsburg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Kreispackungen

Zu einer Konstruktion des antiken Geometers Apollonios von Perge gibt es überraschende Neuigkeiten – mehr als 2000 Jahre danach.

Von Christoph Pöppe

Unendlich viele Kreise sind dicht an dicht in einen großen umfassenden Kreis eingebettet – zumindest theoretisch. Irgendwann hat zwar das Programm, das diese Bilder gezeichnet hat, seine Arbeit eingestellt, und wer genau hinschaut, sieht sogar, dass ein paar Kreise fehlen. Aber im Prinzip passt in jeden Zwickel zwischen drei einander berührenden Kreisen noch ein vierter. Der lässt drei noch kleinere Zwickel unbedeckt, und so weiter … Wie ist eine solche Kreispackung konstruiert?

Zwei Kreise beliebiger Größe so in die Ebene zu setzen, dass sie genau einen Punkt – und in diesem Punkt eine Tangente – gemeinsam haben, ist kein Problem. Auch die Größe des dritten Kreises, der die beiden berührt, ist noch frei wählbar.

„Berühren" können sich zwei Kreise von außen wie von innen. Der dritte Kreis darf die beiden ersten auch umschließen oder von zwei Kreisen der eine gänzlich im anderen stecken, sodass der innere Kreis nur in einem Punkt am Umfang des äußeren anliegt. Dass allerdings drei Kreise an einem einzigen Punkt zusammengeklemmt sind, gilt als „langweiliger" Fall, der hier nicht weiter betrachtet werden soll.

Drei Kreise beliebiger Größe kann man stets so anordnen, dass jeder jeden berührt, häufig sogar auf mehrere verschiedene Weisen. Aber der vierte! Der ist in seinen Möglichkeiten stark eingeschränkt. Man werfe ein kreisförmiges Lasso über drei einander von außen berührende Kreise und ziehe es stramm – wobei es streng kreisförmig bleiben muss. Oder man setze einen kreisförmigen Luftballon in den Zwickel zwischen den drei Kreisen und blase ihn auf, bis er überall anstößt.

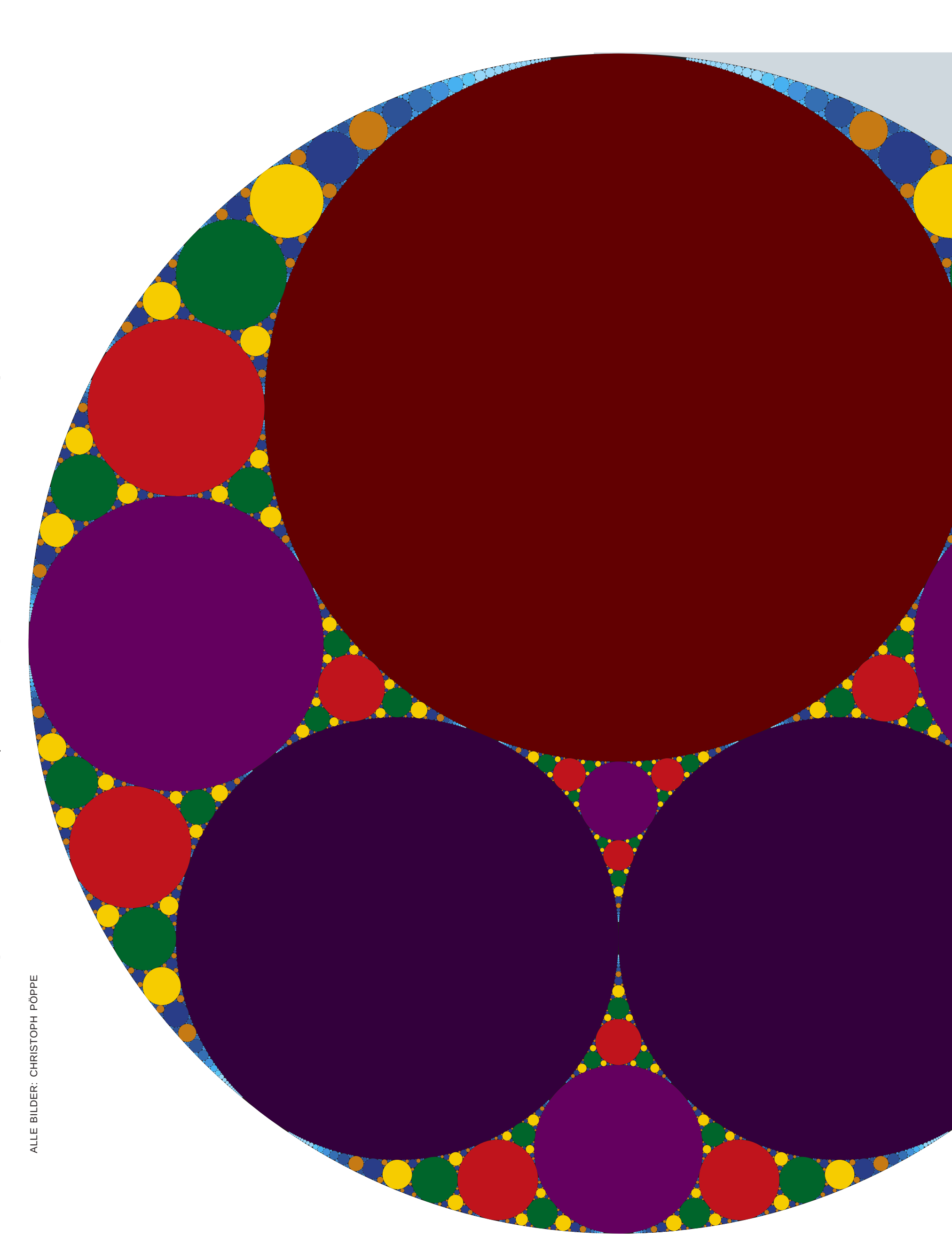
Irgendwie ist einem klar, dass dieses Verfahren stets funktioniert und zu einem eindeutigen Ergebnis führt. Aber für einen echten Geometer ist das ungefähr wie Spielen im Dreck. Existenz und Eindeutigkeit aus der physikalischen Anschauung entnehmen, Approximieren, am Ende noch Grenzwerte bilden – igitt! Nach dem klassischen griechischen Reinheitsgebot sind für die Konstruktion des vierten Kreises ausschließlich Zirkel und Lineal zu verwenden.

Es geht mit Zirkel und Lineal, wenn auch nicht ganz einfach. Apollonios von Perge (um 262 – um 190 vor Christus) hat die Lösung des Problems ausgearbeitet, das heute apollonisches Berührungsproblem heißt: zu drei gegebenen Kreisen einen vierten zu finden, der alle drei berührt. Das Problem hat im Allgemeinen acht Lösungen; wenn aber die drei Kreise sich bereits berühren, sind es nur zwei.

Falls einer der drei gegebenen Kreise die anderen umschließt, entstehen zwei Zwickel, die jeder mit einem Kreis gefüllt werden können; im anderen Fall sind die beiden Lösungen, wie oben beschrieben, ein äußerer und ein innerer Kreis.

Im 17. Jahrhundert schuf René Descartes (1596 – 1650) die Koordinatengeometrie: Aus Punkten in der Ebene wurden Paare reeller Zahlen, und jeder Konstruktionsschritt mit Zirkel und Lineal lief nunmehr auf die Lösung einer linearen (Lineal) oder quadratischen Gleichung (Zirkel) hinaus. Die beiden Lösungen des apollonischen Problems bestehen aus jeweils drei Zahlen, die den gesuchten Kreis vollständig charakterisieren: eine für den Radius und zwei für die Koordinaten des Mittelpunkts.

Die Gleichungen, die zu einer geometrischen Konstruktion gehören, sind



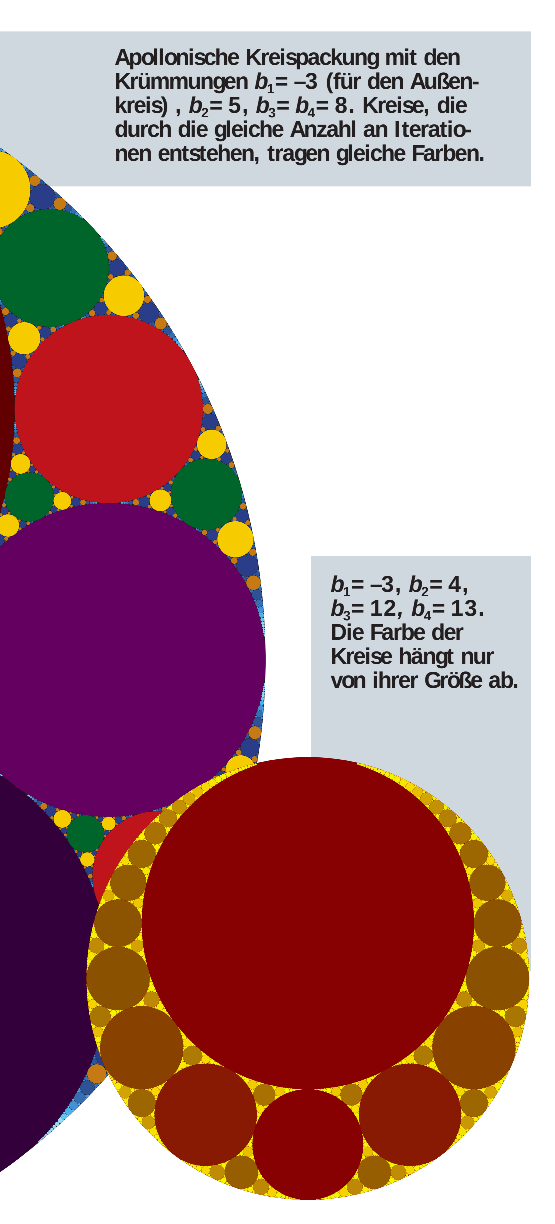
ALLE BILDER: CHRISTOPH PÖPPE

im Allgemeinen nicht besonders ansehnlich. Aber für das apollonische Berührungsproblem fand Descartes eine hübsche Formulierung, mit einem Trick: Anstelle der Kreisradien selbst betrachtete er deren Kehrwerte, die so genannten Krümmungen. Wenn b_1, b_2, b_3 und b_4 die Krümmungen von vier Kreisen sind, deren jeder jeden berührt, dann gilt

$$b_1^2+b_2^2+b_3^2+b_4^2=\frac{1}{2}(b_1+b_2+b_3+b_4)^2$$

Diese Formel gilt für innen wie außen liegende Kreise gleichermaßen. Nur ist die Krümmung des alle umschließenden Kreises mit dem negativen Vorzeichen zu nehmen. Einer oder zwei der vier Werte dürfen null sein; ein Kreis mit der Krümmung null ist eine Gerade.

In späteren Jahrhunderten ist die Descartes'sche Kreisgleichung mehrfach von anderen Mathematikern wiederentdeckt und neu bewiesen worden. Frederick Soddy (1877–1956), im Hauptberuf Chemiker und 1921 mit dem Nobelpreis für die Entdeckung der Isotope geehrt, fand 1936 eine Verallgemeinerung von Kreisen auf Sphären (Hohlkugeln) in drei Dimensionen (Spektrum der Wissenschaft 07/1998, S. 80), und ein Jahr später konnte Thorold Gossett zeigen, dass ein analoger Satz auch im n-dimensionalen Raum gilt.



Apollonische Kreispackung mit den Krümmungen $b_1 = -3$ (für den Außenkreis) , $b_2 = 5$, $b_3 = b_4 = 8$. Kreise, die durch die gleiche Anzahl an Iterationen entstehen, tragen gleiche Farben.

$b_1 = -3$, $b_2 = 4$, $b_3 = 12$, $b_4 = 13$. Die Farbe der Kreise hängt nur von ihrer Größe ab.

Sphärenküsse

Bei Kugeln hat es sich eingebürgert, von „küssen" statt von „berühren" zu sprechen. Obendrein mag die Entdeckung, dass im n-dimensionalen Raum jede von n+2 Sphären alle n+1 anderen zugleich küssen kann, bei beiden Forschern romantische Gefühle ausgelöst haben; jedenfalls haben beide Forscher ihre Entdeckungen in der Zeitschrift „Nature" in Gedichtform veröffentlicht.

Damit konnte das Feld als abgegrast gelten. Niemand hätte gedacht, dass eine Formel von der klassischen Schönheit der Descartes'schen Kreisgleichung noch der Entdeckung harrte. Aber es gibt sie. Allan R. Wilks von den AT&T-Laboratorien in Florham Park (New Jersey) ist durch Zufall auf sie gestoßen. Zusammen mit ihm haben seine Kollegen Ronald L. Graham, Jeffrey C. Lagarias und Colin L. Mallows sowie Catherine H. Yan von der Texas A&M University die Entdeckung zu einer großen Theorie ausgearbeitet, die inzwischen weit in andere Gebiete der Mathematik wie Zahlentheorie und Gruppentheorie hineinreicht.

Die neue Formel leistet für die Koordinaten der Kreismittelpunkte dasselbe wie die Descartes'sche Formel für die Krümmungen. Sie verknüpft sie zu einer einzigen, quadratischen Gleichung, in der sie alle vier gleichberechtigt vorkommen:

$$(b_1z_1)^2+(b_2z_2)^2+(b_3z_3)^2+(b_4z_4)^2$$
$$=\frac{1}{2}(b_1z_1+b_2z_2+b_3z_3+b_4z_4)^2$$

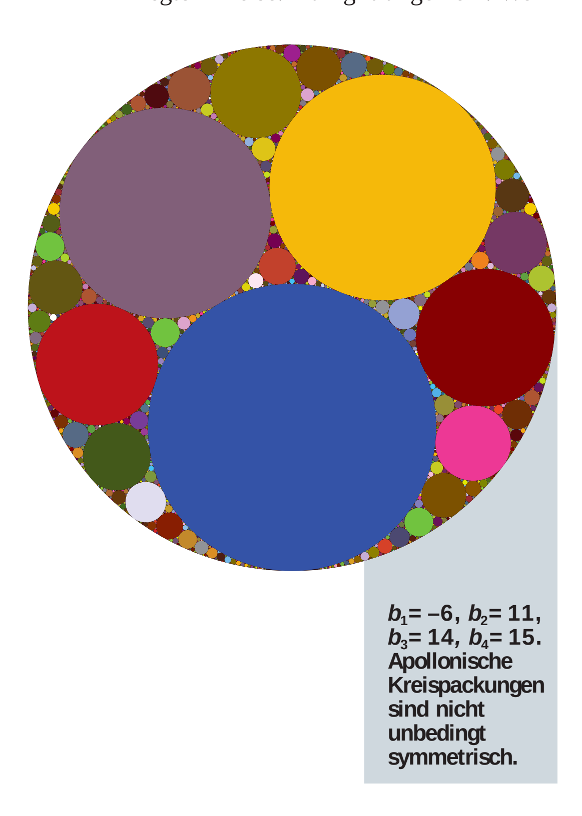
Dabei sind die Kreismittelpunkte z_1, z_2, z_3 und z_4 als komplexe Zahlen aufzufassen.

Eine komplexe Zahl ist zunächst nur ein Paar gewöhnlicher (reeller) Zahlen, wie die Koordinaten eines Punktes in der Ebene. Deswegen werden auch die komplexen Zahlen mit den Punkten der Ebene identifiziert. Die x-Achse des klassischen Koordinatensystems entspricht den reellen Zahlen und die y-Achse den „imaginären Zahlen", das heißt den Vielfachen der Wurzel aus –1, die auch mit ▶

i bezeichnet wird. Man rechnet mit den komplexen Zahlen formal genauso wie mit den reellen, muss sich allerdings gelegentlich daran erinnern, dass $i^2 = -1$ ist.

Wenn drei der vier Kreise bekannt sind, dann sind sowohl die klassische als auch die erweiterte Descartes'sche Kreisformel quadratische Gleichungen für die Daten (Krümmung und Mittelpunkt) des vierten Kreises. Zu drei vorhandenen Kreisen ist also ein vierter, apollonischer Kreis mit mäßiger Mühe auszurechnen. Genauer gesagt: zwei vierte Kreise, denn eine quadratische Gleichung hat im Allgemeinen zwei Lösungen.

Es kommt noch schöner. Wenn man schon vier apollonische Kreise (ein „apollonisches Quadrupel") hat, kann man einen beliebigen von ihnen genauer in Augenschein nehmen (und die drei anderen für den Moment als festgelegt ansehen). Er ist dann die eine Lösung einer quadratischen Gleichung, und die andere Lösung berührt ebenfalls die drei festgelegten Kreise. Nun gilt allgemein: Wenn man eine Lösung einer quadratischen Gleichung hat, dann ist die andere nicht mehr schwer. In der berüchtigten „Mitternachtsformel", die man in der Schule für die Lösung einer quadratischen Gleichung lernt, muss man nur das Vorzeichen vor der Wurzel umdrehen; es gibt andere Berechnungsverfahren, die einem ebenfalls das Wurzelziehen ersparen.



$b_1 = -6$, $b_2 = 11$, $b_3 = 14$, $b_4 = 15$. Apollonische Kreispackungen sind nicht unbedingt symmetrisch.

Das heißt: Hat man erst ein apollonisches Quadrupel, dann kann man daraus durch relativ einfache Rechenschritte vier weitere machen, die sich von dem ursprünglichen durch jeweils genau einen Kreis unterscheiden: Man ersetzt jeweils einen Kreis durch seinen Kollegen vom anderen Vorzeichen. Aus jedem neuen Quadrupel macht man wieder drei neue (das vierte führt auf das Vorgängerquadrupel zurück), und so weiter. Mit jedem Rechenschritt verdreifacht sich die Anzahl der Kreise. Dabei werden die verbleibenden Zwickel zwar immer mehr, in ihrer Gesamtfläche aber verschwindend gering.

Spiegelkabinett mit Kreisspiegeln

Wilks und seine Kollegen entdeckten noch mehr: Wenn die Krümmungen des Ur-Quadrupels ganze Zahlen sind, dann gilt das für sämtliche daraus entstehenden Quadrupel. Und nicht nur das: Auch die Koordinaten der Mittelpunkte haben eine besonders einfache Form. Sie sind zwar nicht selbst ganzzahlig – wie sollten auch sonst unendlich viele Kreise in einen großen Kreis passen? –, aber das Produkt aus Krümmung und Mittelpunktskoordinaten ist jeweils eine ganze Zahl. Das hängt damit zusammen, dass man die zweite Lösung einer quadratischen Gleichung mit Hilfe der ersten einfach berechnen kann, ist aber deswegen keineswegs selbstverständlich. Die Frage, welche Quadrupel ganzer Zahlen überhaupt die Descartes'sche Kreisgleichung erfüllen und deshalb als Ur-Quadrupel dienen können, führt in ungeahnte Tiefen der Zahlentheorie.

Das Verfahren, das aus dem einen vierten Kreis den anderen vierten Kreis macht, ist eine Abbildung („Funktion") im mathematischen Sinne des Wortes, nämlich eine Vorschrift mit eindeutigem Ergebnis, die auf jeden beliebigen und nicht nur auf diesen speziellen Kreis anwendbar ist. Darüber hinaus ist es sogar im geometrischen Sinne eine Abbildung, und zwar eine so genannte Spiegelung am Kreis. Diese auch Inversion genannte Transformation kehrt das Innere eines bestimmten Kreises zuäußerst und umgekehrt. Dabei wird ein Kreis wieder in einen Kreis verwandelt, es sei denn, er ginge durch den Mittelpunkt des Inversionskreises. In diesem Fall wird er zu einer Geraden, und umgekehrt. Zweimal eine Inversion an demselben Kreis führt jeden Punkt auf sich selbst zurück: Die Inversion ist, wie die gewöhnliche Spiegelung, ihre eigene Umkehrabbildung.

Der Inversionskreis für unsere Abbildung ist derjenige eindeutig bestimmte Kreis, der auf den drei festen Kreisen senkrecht steht. Ein Urquadrupel definiert also vier verschiedene Inversionen, denn es gibt vier Möglichkeiten, aus den vier Urkreisen drei auszuwählen. Wendet man nun auf einen Kreis des Urquadrupels (oder einen beliebigen Kreis der apollonischen Packung) diese vier Inversionen in beliebiger Folge an, landet man bei einem anderen Kreis der Packung. Zweimal unmittelbar hintereinander dieselbe Inversion anzuwenden wäre allerdings Zeitverschwendung, weil sie dem Nichtstun gleichkäme. Auf diesem Wege kann man systematisch alle Kreise der Packung erzeugen – ein (Kreis-)Spiegelkabinett mit unendlichen vielen Spiegelbildern auf begrenztem Raum! Alle Kombinationen der vier Inversionen bilden eine (sehr interessante) Gruppe im mathematischen Sinne. Das gilt auch dann, wenn die Krümmungen des Urquadrupels nicht ganzzahlig sind.

Mehrere Abbildungen in immer wieder verschiedenen Folgen auf ein Ausgangsobjekt angewendet – das ist ein beliebtes Rezept zur Erzeugung von Fraktalen, das unter dem Namen „iterierte Funktionensysteme" bekannt geworden ist. In der Tat sind apollonische Packungen Fraktale, auch wenn ihnen eine von deren Lieblingseigenschaften fehlt, nämlich die Selbstähnlichkeit.

Die Mathematiker haben auch nicht versäumt, die Menge zu studieren, die übrig bleibt, wenn man all die unendlich vielen Kreise wegnimmt. Ihre Fläche ist null, aber ihre Länge – man kann theoretisch alle Kreisränder zeichnen, ohne den Stift abzusetzen – ist unendlich, und ihre Dimension liegt zwischen 1 und 2: mehr als eine Linie, weniger als eine Fläche – gebrochen eben, wie der Name „Fraktal" sagt. Die neuesten Schätzungen liegen bei 1,30568. ■

***Christoph Pöppe** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Literaturhinweise

Selbstinverse Fraktale, apollonische Netze und Seife. Von Benoît Mandelbrot. Kapitel 18 in „Die Fraktale Geometrie der Natur", Birkhäuser, Basel 1987.

Circle Game. Von Ivars Peterson in: Science News, Bd. 159, S. 254, 21. April 2001.

Beyond the Descartes Circle Theorem. Von Jeffrey C. Lagarias, Colin L. Mallows und Allan R. Wilks, 2001. Online über www.arxiv.org: math.MG/0101066

Apollonian Circle Packings. Vier Preprints mit verschiedenen Untertiteln von Ronald L. Graham et al., 2001. Online über www.arxiv.org: math.NT/0009113; math.MG/0010298; math.MG/0010302; math.MG/0010324.



Sichere Flugausbildung mit Flugsimulator

Eine Lücke, die hier noch klafft und in den letzten Jahren immer empfindlicher bemerkbar wurde, kann nun – wenigstens zum Teil – durch den „Link-Trainer" ausgefüllt werden, dessen Bedeutung vor allem darin liegt, daß mit ihm nicht nur Schulflüge, sondern auch Schul-Abstürze „im Saal" durchexerziert werden können. … Dieser elektronischen Steuerung, die aus 242 Elektronenröhren und zwölf Kilometer Verbindungsdrähten aufgebaut ist, liegen die wichtigsten aerodynamischen Gleichungen des Hochgeschwindigkeitsflugs zu Grunde. … Selbst das Heulen des Motors, … das Rütteln der Böen können so exakt nachgeahmt werden, daß der Flugschüler alle Sinnesempfindungen des wirklichen Fluges erlebt. *(Orion Illustrierte Naturwissenschaftlich-technische Zeitschrift für Jedermann, 7. Jg., Nr. 21, S. 848, 1952)*



Im Link-Trainer lernt der Flugschüler alle notwendigen Handgriffe.

Die Manager-Krankheit

Mit der sogenannten „Manager-Krankheit" meint man den jetzt besonders häufig auftretenden Herzschlag, der Politiker, Wirtschaftler und Journalisten in den sogenannten besten Jahren plötzlich dahinrafft. Kürzlich hat ein Unternehmen eine Untersuchung seiner 600 leitenden Angestellten durchgeführt, die ein erschütterndes Resultat ergab. Nicht weniger als 30 % waren stark erholungsbedürftig, sie mußten mehrwöchige Kuren absolvieren … – Internisten fordern, daß der Achtstundentag auch für leitende Angestellte eingeführt und bei der Einstellung vertraglich festgelegt wird. *(Westermanns Monatshefte, 93. Jg., Heft 8, S. 84, 1952/53)*

Neues vom Schnee

Der Schnee wächst in großen Höhen in Form einzelner Kristalle und wächst, während er eine beträchtliche Höhe durchfällt, bis die Flocke in Erscheinung tritt. … Die größten Schneeflocken bestehen aus 2000 bis 3000 Einzelkristallen, man darf an gut 3000 ebene Sterne denken … Bei mittlerer Fallgeschwindigkeit schweben … sie im Mittel 1 1/2 Stunden in der Luft, ehe sie den Boden erreichen. … Es kommt vor, dass zwei Flocken, die beim Fallen nahe aneinander geraten, sich im Nu zu einer Flocke vereinigen. Die Bewegung vollzieht sich so rasch, daß sie nur die Folge einer Anziehungskraft zwischen beiden sein kann. … Auf der Dipol-Natur der Eisteilchen beruht die Vereinigung zweier Flocken. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 5. Jg., Heft 11, S. 470, 1952)*

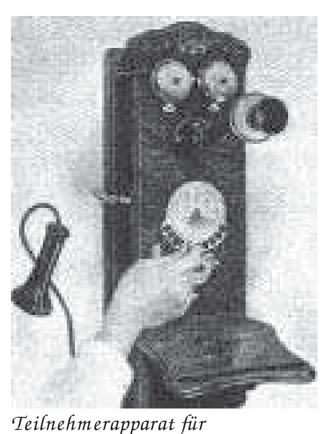


Edelsteinfarben

Die Farbe des Opals rührt von unzähligen mikroskopischen Sprüngen und Rissen in seiner Masse her, welche aus wasserhaltiger amorpher Kieselsäure besteht und in der Natur zweifellos durch sehr langsame Eintrocknung einer Kieselsäuregallerte gebildet wurde. Dem Träger eines solchen Steines ist es infolgedessen sehr anzurathen, ihn vor Wärme sorgfältig zu behüten, z.B. die Hand, an welcher der Stein sich befindet, nicht allzu nahe an ein offenes Feuer oder einen heißen Ofen zu bringen, weil die Austrocknung des Steines unerwünscht weitergehen und ihm sein Farbenspiel wieder entziehen könnte. *(Der Stein der Weisen, Bd. 28, S. 355, 1902)*

Die automatischen Telephone und Vermittelungsumschalter

Die Vorzüge seien für die Teilnehmer die, dass sie sich nicht mit Telephonistinnen herum zu ärgern haben würden … An jedem Sprechapparat befindet sich … eine um ihre Achse drehbare runde Metallscheibe mit Vertiefungen, die mit den Zahlen 1-0 (10) oder 0-9 bezeichnet sind … Durch Einlegen eines Fingers in die ovale Oeffnung wird die Scheibe gedreht, auf die Teilnehmernummer eingestellt, worauf sie beim Loslassen durch eine Spiralfeder wieder in die ursprüngliche Lage zurückgebracht wird. …Vor der Drehung der Anrufscheibe ist der Hörer abzuheben und nach Beendigung des Gesprächs, zugleich zwecks Aufhebung der Verbindung wieder anzuhängen. *(Dinglers polyt. Journal, Bd. 317, Heft 48, S. 96, 1902)*



Teilnehmerapparat für automatische Vermittelungsämter

Walduntersuchungen auf schweflige Säure

Da die Vegetationsorgane besonders der Nadelhölzer in hohem Maße durch die in der Luft ihnen zugeführten Rauchsäuren … leiden, so ist der mehr oder minder große Gehalt der Atmosphäre an solchen für das Gedeihen der Waldungen von eminent wichtiger Bedeutung. … Um nun die nothwendigen Untersuchungen der Waldluft auf schweflige Säure ausführen zu können, hat Wislicenus eine einfache Vorrichtung, sogenannte Probelappen von weißer Farbe, hergestellt und an den zu untersuchenden Oertlichkeiten ausgelegt, um nach deren Verbrennung mittelst chemischer Analyse die Durchtränkung derselben mit Rauchsäure nachzuweisen und zugleich auch durch scharfe Ocularbesichtigung der Probelappen den Grad der Berußung festzustellen. Diese Untersuchungen haben den Beweis erbracht, daß die Luft selbst in einer Entfernung von 10 Kilometer von jeder größeren Rauchquelle noch reichliche Mengen an schwefliger Säure enthält, dass weiter eine Beimischung derselben zur Atmosphäre im Verhältniß von 1 : 500 000 noch störend auf die Vegetationsfähigkeit wirkt, daß endlich eine Beimischung von 1 : 2000 die sofortige Entnadelung bei Fichten und Tannen bewirkt. *(Der Stein der Weisen, Bd. 28, S. 282, 1902)*

Der Untergang von Xkipché

Abrupt endete die Hochkultur der Maya im Tiefland Yucatáns. Krieg oder Klimawandel – noch heute rätseln Archäologen, warum blühende Städte plötzlich verfielen.

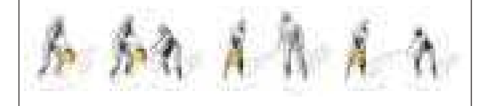
Weitere Themen im Dezember

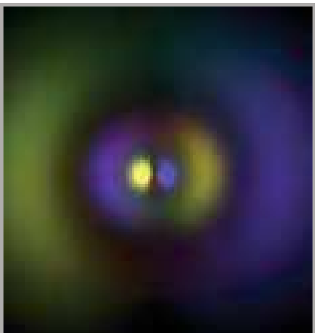
Technik gegen Bioterror

Biologen und Ingenieure entwickeln Frühwarnsysteme, um Anschläge mit biologischen Waffen sofort zu erkennen und deren Auswirkungen zu mildern.

Computer ohne Uhren

Anarchie ist nicht nur machbar, sondern nützlich: Die Komponenten eines Computerchips können effektiver arbeiten, wenn sie sich nicht an einen zentralen Taktgeber halten.





Ein Blick auf den Ursprung von Raum und Zeit

Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung sind offenbar gigantisch vergrößerte Überbleibsel der ersten Quantensprünge nach dem Urknall.



Krebsgeschwülste aushungern

Viel Vorschusslorbeeren erhielten potenzielle Medikamente, die einem Tumor die Blutzufuhr abdrehen sollen. Wie stehen inzwischen die Aussichten auf Erfolg?



Der Sternmull – Eine Nase mit Fingern

Wie Maulwürfe sucht der Sternmull unterirdisch kleines Getier. Um es zu ertasten, bewegen sich die 22 Anhänge seiner absonderlichen Nase immerzu so schnell, dass man sie nicht mehr sieht. Diese Fortsätze sitzen dicht gepackt voller Tastorgane; sie sind viel empfindlicher als unsere Fingerkuppen.